

НАНО- и МИКРОСИСТЕМНАЯ ТЕХНИКА

№ 5 ✧ 2007

ЕЖЕМЕСЯЧНЫЙ МЕЖДИСЦИПЛИНАРНЫЙ ТЕОРЕТИЧЕСКИЙ И ПРИКЛАДНОЙ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ

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

Издается с 1999 г.

Главный редактор

Мальцев П. П.

Зам. гл. редактора

Лучинин В. В.

Редакционный совет:

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

Редакционная коллегия:

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

Отв. секретарь

Лысенко А. В.

Редакция:

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

Учредитель:

Издательство
"Новые технологии"

СОДЕРЖАНИЕ

ОБЩИЕ ВОПРОСЫ

Бочаров Л. Ю., Мальцев П. П. Основные направления и перспективы развития квантовых информационных технологий за рубежом 2

НАНОТЕХНОЛОГИИ И ЗОНДОВАЯ МИКРОСКОПИЯ

Бобков С. Г., Киреев В. Ю. Проблемы перехода микроэлектроники в субнанометровую область размеров. Часть 1. Общие положения и возможности литографических и нелитографических методов формирования топологии 11

МАТЕРИАЛОВЕДЧЕСКИЕ И ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ НМСТ

Обухов И. А. Самоохлаждение эмиттерного контакта квантового провода 21
Шерстнев П. В., Шешин Е. П., Чуприк А. А. Исследование работы выхода кантилевера по результатам атомно-силовой микроскопии бинарной композиции Cu—Cr 24
Гушин О. П., Данилкин Е. В., Падерин А. Ю. Методы формирования канавок в технологии изготовления шевельвых ДМОП-транзисторов 26
Бобринецкий И. И., Неволин В. К., Симунин М. М. Влияние сорбции паров спирта на проводимость структур на основе углеродных нанотрубок 29
Волков Г. М. Нанокompозит системы углерод—углерод. Биоинженерный и машиностроительный потенциал 34

КОНСТРУИРОВАНИЕ И МОДЕЛИРОВАНИЕ НМСТ

Гридчин А. В., Колчужин В. А., Гридчин В. А., Герлах У. Г. Исследование четырехконтактных тензочувствительных структур методом конечно-элементного моделирования 38
Любимский В. М. Изгибы круглой и прямоугольной диафрагм при действии электростатического притяжения и поперечной нагрузки 43

ЭЛЕМЕНТЫ НМСТ

Ушков А. В., Козлов А. Н. Проектирование, изготовление и исследование кремниевых чувствительных элементов давления со встроенной защитой от перегрузок 49
Мухуров Н. И., Ефремов Г. И. Анализ взаимосвязи электромеханических характеристик электростатических торсионных микросистем 52
Горнев Е. С., Дайнеко А. В., Зайцев Н. А., Пастухова Ю. М. Исследование и разработка микровакуумного триода на основе полевой эмиссии 59
Колешко В. М., Чашинский А. С., Хмурович Н. В. Сенсорные молекулярные контейнеры водорода 63
Тимошенков С. П., Зотов С. А., Калугин В. В., Балычев В. Н., Морозова Е. С. Разработка микропривода для управления микрозеркалом 66

ПРИМЕНЕНИЕ НМСТ

Яшин К. Д., Осипович В. С., Пицук С. Е. Люминесцентные полупроводниковые наночастицы 70

НОВОСТИ НАНОТЕХНОЛОГИЙ 75

Contents 79

ИНФОРМАЦИЯ 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:

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

УДК 621.3.049.77

Л. Ю. Бочаров, канд. техн. наук,
ИПИ РАЕН;
П. П. Мальцев, д-р техн. наук, проф.,
МИРЭА

ОСНОВНЫЕ НАПРАВЛЕНИЯ И ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ КВАНТОВЫХ ИНФОРМАЦИОННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ ЗА РУБЕЖОМ

Рассмотрены объемы инвестиций в области квантовых информационных технологий для военных целей, выделяемые мировыми лидерами в этой области (США и Япония). В этих странах сконцентрировано более половины мирового объема инвестиций. Приведены примеры реализации работ по военной квантовой информатике.

В настоящее время в мире наблюдается повышенный интерес государственных и коммерческих структур к исследованиям и разработкам в области квантовых информационных технологий (теория квантовой информации, квантовые компьютеры, квантовая криптография и связь и т. д.). Из года в год ускоренными темпами растут объемы инвестиций в исследования и разработки по созданию квантовых компьютеров и систем квантовой криптографии и связи (квантовых информационных технологий). В 2005 г. мировые ежегодные объемы государственных инвестиций в эту сферу оцениваются в размере 210—230 млн долл. США. Работы в области квантовых информационных технологий получили статус приоритетных государственных программ в США, Японии, Канаде, Австралии, Сингапуре и в странах ЕС.

Основные сведения о государственных программах исследований и разработок, проводимых в этих странах, представлены в табл. 1.

Среди крупных международных программ, выполнявшихся в 2004—2005 гг., следует отметить следующие проекты:

1. Проект ATESIT (*Active Teleportation and Entangled State Information Technology*). Сроки проведения: 01.08.2001 г.—31.07.2005 г. Принимали участие университеты и институты Италии, Нидерландов, Израиля и Великобритании. Основной задачей исследований являлось создание источников и детекторов единичных фотонов (область квантовой телепортации), разработка алгоритмов коррекции ошибок в передаче данных. В ходе выполнения программы отрабатывались вопросы

создания фемтосекундного УФ-лазера для управления кубитами (конструкции кубитов на природных кристаллах).

2. Проект SAWPHOTON (*Single electron source generating individual photons for secure optical communications*). Сроки проведения: 01.05.2001 г.—30.04.2004 г. Принимали участие ученые из Дании, Великобритании и Италии. Целью работ являлось проведение комплекса исследований по созданию приборов (для систем квантовой телепортации), принцип действия которых основан на захвате электронов поверхностной акустической волной.

3. Проект QuVIC (*Quantum and Biologically Inspired Computing*). Сроки проведения: 01.01.2001 г.—31.12.2005 г. Исследования проводились по заказу Национального научного фонда США (NSF). В рамках проекта были выполнены работы по комплексному изучению принципов создания систем, реализующих механизмы квантовых и биологических вычислений.

Таблица 1

Основные сведения о государственных программах исследований и разработок

Страна	Ежегодные объемы государственного финансирования, млн долл. США	Программы и государственные заказы исследований и разработок
США	110—120	Программы: QuIST, FoQuS. Заказы: Министерство обороны (ONR, ARO, AFOSR, DARPA), Национальный научный фонд (NSF), Национальный институт стандартов и технологий (NIST), Министерство энергетики (DOE-LANL), Национальное аэрокосмическое агентство (NASA)
Япония	25—30	Проекты: ERATO, ICORP, CREST, PRESTO. Заказчик: Министерство науки и технологии Японии
Канада	16	
Австралия	7,6	
Страны ЕС	10—30	Проекты: QIPC (в рамках FP5 FET-EC), QIST (Австрия), QUANTOP (Дания), "National Initiative on Quantum Information" (Франция), "DFG-Schwerpunkt: Quanteninformationsverarbeitung" (Германия), QIP IRC (Великобритания, в рамках QUIST) и т. д.
Сингапур	4,8	Заказчик: Агентство по науке, исследованиям и технологиям Сингапура
Китай	4,9 (5,8??)	Заказчики: Министерство науки и технологий, Министерство образования

Мировыми лидерами по объемам государственного финансирования исследований в области квантовых информационных технологий являются США и Япония. Общая доля этих стран составляет примерно 70—80 % от общего мирового объема инвестиций (рис. 1, см. вторую сторону обложки).

Значительный объем американских исследований в области квантовых информационных технологий выполняется по заказам Министерства обороны США и финансируется в рамках следующих бюджетных проектов.

Фундаментальные исследования (бюджетная категория 6.1)

- Проект PE № 0601101A (Комплексная целевая программа (КЦП) "Независимые исследования в НИО МО США" — *In-House Laboratory Independent Research*, подраздел 91A). Заказчик — сухопутные войска США. Исполнитель работ — Центр исследований и разработок ракетной и авиационной техники (*Aviation and Missile RDEC*). Одной из задач работ является подготовка научно-экспериментальной базы для исследований в области квантовой обработки информации и реализации механизмов квантовых вычислений. Запланированные объемы финансирования работ по подразделу 91A составляют: 3,055 млн долл. (2005 фин. г.); 2,661 млн долл. (2006 фин. г.); 2,728 млн долл. (2007 фин. г.).
- Проект PE № 0601102F (КЦП "Исследования в области оборонных наук" — *Defense Research Sciences*). Заказчик — ВВС США. Раздел 2305 "Электроника", программа "Исследования в области технологий квантовой информации" (*Advanced Research in Quantum Info Tech*). Объем финансирования работ по разделу в 2005 фин. г. составляет 0,991 млн долл. Исследования направлены на поиск технических решений по созданию сверхпроводниковых квантовых компьютеров. Раздел 2311 "Информатика и науки о космосе" (*Space and Information Sciences*) предусматривает проведение исследований в области создания архитектур квантовых компьютеров для быстрого решения комплексных задач гидро- и/или аэродинамики. Общий запланированный объем ассигнований по разделу 2311 в 2005 фин. г. составил 10,770 млн долл.
- Проект PE № 0601153N (КЦП "Исследования в области оборонных наук" — *Defense Research Sciences*). Подраздел "Информатика" — *Information Sciences*). Заказчик — ВМС США. Проводятся исследования по выявлению перспективных принципов построения квантовых компьютеров и систем квантовой криптографии. Сведения об объемах финансирования этих работ неизвестны.

Прикладные исследования (бюджетная категория 6.2)

- Проект PE № 0602716E (Раздел "Технологии электроники", программа *Focused Quantum Systems (FoQuS)*). Заказчик — Управление перспективных исследований и разработок МО США (DARPA). Запланированные объемы финансирования исследований по программе FoQuS составляют: 13,753 млн долл. (2005 фин. г.); 24,703 млн долл. (2006 фин. г.); 24,110 млн долл. (2007 фин. г.). Надо отметить, что в части работ по созданию квантовых компьютеров FoQuS является продолжением программы *Quantum Information Science and Technology (QuIST)*, завершившейся в конце 2005 фин. г. Дальнейшие работы в области систем квантовой криптографии и связи интегрированы в другие программы. Финансирование последнего этапа программы QuIST предусмотрено в размере 25,437 млн долл. С 2006 фин. г. в рамках этого же проекта № 0602716E стартовала новая дополнительная программа *CAD-QT (Cognitively Augmented Design for Quantum Technology)*, ориентированная на решение проблем автоматизированного проектирования элементной базы для квантовых вычислительных систем. Объем ее финансирования в 2006 фин. г. составил примерно 2,320 млн долл. Надо отметить, что исследования в области выявления потенциальных возможностей квантовых вычислительных систем проводятся по заказам DARPA в рамках проекта PE № 0602303E, раздел IT-02 "Информационные технологии", программа "Высокопроизводительные вычислительные системы" (*High Productivity Computing Systems (HPCS)*).
- Проект № 0602702F. (Раздел "Системы боевого управления и связи" — *Command Control and Communications*). Подраздел 4594 "Технологии информационных систем" — *Information Technology*). Заказчик — ВВС США. На период 2005—2007 фин. гг. запланировано проведение комплекса прикладных исследований по изучению возможностей применения квантовых вычислительных систем и биокомпьютеров в системах боевого управления и связи. Для этих целей предусмотрено финансирование в размере ~12,5 млн долл.

Примечание. В 2004 г. в США общий объем финансирования исследований и разработок в области квантовых информационных технологий (квантовые компьютеры, квантовые криптография и связь, теория квантовой информации и т. д.) превысил 100 млн долл. (по сравнению с 1999 г. увеличился практически в 5 раз). Доля НИР по заказам Министерства обороны США в этом объеме составляет ~60—70 %.

Все проводимые за рубежом исследования и разработки в области квантовых компьютеров можно систематизировать в рамках следующих научно-технических направлений (НТН):

4. ЯМР — квантовые компьютеры (квантовые компьютеры на ядерном магнитном резонансе (ЯМР), реализованные в молекулярных жидкостях или в твердых телах).

5. Квантовые компьютеры на ионах в ловушках.

6. Квантовые компьютеры на нейтральных атомах.

7. Квантовые операции на одиночных атомах в микрорезонаторах (квантовая оптика резонансных явлений — cavity QED).

8. Квантовые компьютеры на основе линейных оптических элементов (реализация квантовых операций с помощью линейных оптических элементов — "оптический квантовый компьютер").

9. Твердотельные конструкции квантовых компьютеров.

10. Квантовые компьютеры на сверхпроводниковых элементах. В таких системах кубиты выполнены на сверхпроводниковых мезоструктурах, в которых квантовая информация кодируется либо числом сверхпроводящих пар в квантовой точке (charge-based qubits — сверхпроводниковые зарядовые кубиты), либо направлением сверхпро-

водящего тока в скивде (flux-based qubits — сверхпроводниковые кубиты на скивдах).

11. Квантовые компьютеры на основе других ("уникальных") принципов построения кубитов. Например, в рамках данного направления исследуются устройства квантового компьютера на электронах, "плавающих" на поверхности жидкого сверхтекучего He (в двумерном электронном газе — DEG). Известно, что электроны, находящиеся вблизи границы жидкого He и вакуума, попадают в потенциальную яму сил изображения и создают DEG. Наинизшее и первое возбужденное состояние электрона в этой яме служит квантовым битом.

12. Обеспечивающие теории и научно-технические направления (теория квантовой информации, архитектуры построения, теория и методы преодоления процессов декогерентизации, алгоритмы квантовых вычислений, методы коррекции ошибок, моделирование работы квантового компьютера и т. д.).

Обобщенные сведения о зарубежных исследованиях и разработках, систематизированные по перечисленным выше научно-техническим направлениям, представлены в табл. 2.

Таблица 2

Сведения об основных зарубежных исследованиях и разработках по созданию квантовых компьютеров

№ по пор.	Научно-исследовательская организация, страна	Область исследований	Научный руководитель/(и) работ	№ НТН
1	Almaden (IBM), США	Квантовые вычислительные операции на ионах Ba ⁺ в ловушке	Devoe R.	2
2	Berkeley Nanosciences and Nanoengineering Institute, США	Сверхпроводниковые кубиты на скивдах, квантовые наноконпьютеры и СКВИДы	Clarke J.	7
3	Boston University, Massachusetts, США	Квантовые операции с помощью линейных оптических элементов	Сергиенко А. В.	5
4	Caltech, США	Квантовые операции на одиночных атомах в микрорезонаторах	Kimble H. J. и Mabuchi H.	3
5	Caltech, США	Квантовые операции на одиночных атомах Cs в микрорезонаторах	Kimble J.	4
6	Caltech, США	Квантовые операции на одиночных атомах Cs в микрорезонаторах	Mabuchi H.	4
7	Caltech, США	Кантливеры с высокой собственной частотой	Roukes M.	6
8	Chalmers University of Technology, Göteborg, Швеция	Сверхпроводниковые зарядовые кубиты	Delsing P.	7
9	CRTBT (Centre de Recherches sur les Très Basses Températures), Grenoble, Франция	Сверхпроводниковые зарядовые кубиты	Buisson O.	7
10	Delft University of Technology, Нидерланды	Сверхпроводниковые зарядовые кубиты	Kouwenhoven	7
11	Delft University of Technology, Нидерланды	Сверхпроводниковые кубиты на скивдах	Moosj	7
12	Delft University of Technology, Нидерланды	Кубиты на электронах в полупроводниковых (GaAs) квантовых точках	Kouwenhoven L.	6
13	Ecole Normale Supérieure, Paris, Франция	Излучения ридбергских атомов	Haroche S.	4
14	Ecole Normale Supérieure, Laboratoire Kastler Brossel, Paris, Франция	Квантовые операции на одиночных атомах в микрорезонаторах	Haroche S.	3
15	ETH, Zurich, Швейцария	Квантовые точки в GaAs	Ensslin K.	6
16	ETH, Zurich, Швейцария	Системы на основе ридбергских атомов	Esslinger T.	4
17	Georgia Tech, Atlanta, США	Магнитные и оптические ловушки/квантовые операции на одиночных атомах в микрорезонаторах	Chapman M. S.	3
18	Georgia Tech, Atlanta, США	Теория построения квантовых компьютеров на нейтральных атомах	You L.	3
19	Georgia Tech, Atlanta, США	Квантовые операции на одиночных атомах Ba ⁺ в микрорезонаторах	Chapman M.	4
20	Harvard, Massachusetts, США	Теория построения квантовых компьютеров на нейтральных атомах	Lukin M.	3

№ по пор.	Научно-исследовательская организация, страна	Область исследований	Научный руководитель/(и) работ	№ НТН
21	Harvard, Massachusetts, США	Нанопроволоки из GaAs, углеродные нанотрубки	Marcus C.	6
22	Hokkaido University, Япония	Квантовые операции с помощью линейных оптических элементов	Takeuchi S.	5
23	IBM, США	Сверхпроводниковые кубиты на скивдах	Koch	7
24	Indian Institute of Science, Bangalore, Индия	Кубиты в ЯМР-квантовом компьютере	Kumar	1
25	Institute d'Optique, Orsay, Франция	Захват одиночных атомов	Grangier P.	3
26	John Hopkins, Maryland, США	Квантовые операции с помощью линейных оптических элементов	Franson J. D.	5
27	JPL, California, США	Квантовые операции с помощью линейных оптических элементов	Dowling J.	5
28	JPL, California, США	Сверхпроводниковые зарядовые кубиты	Echternach	7
29	Lawrence Berkeley National Laboratory (LBNL), США	Кубиты на атомах фосфора ³¹ P в бесспиновом моноизотопном кристалле кремния ²⁸ Si	Schenkel T.	6
30	Lincoln Laboratory, США	Сверхпроводниковые кубиты на скивдах	Oliver, Gouker	7
31	Los Alamos National Laboratory, США	ЯМР-квантовый компьютер	Knill	1
32	Los Alamos National Laboratory, США	Квантовые вычислительные операции на ионах Sr ⁺ в ловушке	Berkeland D.	2
33	Los Alamos National Laboratory, США	Теория создания твердотельных конструкций квантовых компьютеров	Doolen G.	6
34	Los Alamos National Laboratory, США	Кубиты на атомах фосфора ³¹ P в бесспиновом моноизотопном кристалле кремния ²⁸ Si	Hawley M.	6
35	Ludwigs-Maximilians University of München, Германия	Кубиты в ЯМР-квантовом компьютере	Glaser	1
36	Max-Planck Institute Garching, Германия	Квантовые вычислительные операции на ионах (Mg ⁺ , In ⁺) в ловушке Пауля	Walther H.	2
37	Max-Planck Institute Garching, Германия	Системы на основе ридбергских атомов	Rempe G.	4
38	Max-Planck Institute Garching, Германия	Квантовые операции на одиночных атомах Ca ⁺ в микрорезонаторах	Walther H.	4
39	Max-Planck Institute Garching, Германия	Теория построения квантовых компьютеров на одиночных атомах в микрорезонаторах	Cirac J. I.	3
40	Max-Planck Institute Garching, Германия	Квантовые операции на одиночных атомах в микрорезонаторах	Walther H. и Rempe G.	3
41	McMaster University, Hamilton, Ontario, Канада	Квантовые вычислительные операции на ионах Mg ⁺ в ловушке	King B.	2
42	MIT Media Lab, США	Кубиты в ЯМР-квантовом компьютере	Gershenfeld и Chuang	1
43	MIT Nuclear Engineering, США	Кубиты в ЯМР-квантовом компьютере	Cory и Havel	1
44	MIT, США	Квантовые операции на одиночных атомах Ba в микрорезонаторах	Feld M.	4
45	MIT, США	Квантовые точки в GaAs, эффекты декогерентизации	Kastner M.	6
46	MIT, США	Сверхпроводниковые кубиты на скивдах	Berggren	7
47	MIT, США	Теория построения кубитов на сверхпроводниковых мезоструктурах	Левитов Л. С.	7
48	MIT, США	Теория построения кубитов на сверхпроводниковых мезоструктурах	Lloyd S.	7
49	MIT, США	Сверхпроводниковые кубиты на скивдах	Orlando T.	7
50	National Physikal Lab (NPL), Teddington, Великобритания	Кубиты на основе ионов Sr ⁺ в ловушке	Gill P.	2
51	National Security Agency (NSA), США	Квантовые кантиливеры и образование куперовских пар	Schwab K.	6
52	Naval Research Laboratory, США	Спектроскопия одиночных экситонов (электрон-дырочных пар)	Gammon D.	6
53	NEC, Tskuba, Япония	Реализация квантовых операций с помощью линейных оптических элементов	Nakamura J.	5
54	NEC, Tskuba, Япония	Структуры кубитов типа "куперовская пара в коробке"	Nakamura Y.	6
55	NEC, Tskuba, Япония	Сверхпроводниковые зарядовые кубиты	Nakamura	7
56	NIST Gaithersburg, Maryland, США	Оптические решетки	Phillips W. D. и Rolston S. L.	3
57	NIST Gaithersburg, Maryland, США	Теория квантовых операций на одиночных атомах в микрорезонаторах	Williams C. J.	3
58	NIST, Boulder, США	Кубиты на основе ионов ⁹ Be ⁺ или Mg ⁺ в ловушке	Wineland D.	2
59	NIST, США	Сверхпроводниковые фазовые кубиты	Simmonds	7
60	NRC Ottawa, Канада	Квантовые точки в GaAs, подготовка состояний	Sachrajda A.	6
61	NTT Basic Research Laboratory	Сверхпроводниковые кубиты на скивдах	Tanaka	7

№ по пор.	Научно-исследовательская организация, страна	Область исследований	Научный руководитель/(и) работ	№ НТН
62	Ohio State University, США	Магнитные методы измерения спиновых состояний	Hammel P. C.	6
63	Penn State, State College, США	Оптические решетки/излучения ридбергских атомов	Weiss P.	3
64	Physikalisches Institut III Universität Erlangen-Nürnberg, Германия	Сверхпроводниковые кубиты на скивидах	Устинов А. В.	7
65	Quantronics group SPEC-CEA Saclay, Франция	Сверхпроводниковые зарядовые кубиты	Esteve D.	7
66	Rome University, Италия	Сверхпроводниковые кубиты на скивидах	Cosmelli	7
67	Rome University, Италия	Квантовые операции с помощью линейных оптических элементов	DeMartini F.	5
68	Second University of Naples (SUN), Италия	Сверхпроводниковые кубиты на скивидах	Silvestrini P.	7
69	Seoul National University, Ю. Корея	Теория построения кубитов на сверхпроводниковых элементах	Choi Mahn-Soo	7
70	Seoul National University, Ю. Корея	ЯМР-квантовый компьютер	Kim M.	1
71	Stanford University, California, США	Квантовые операции с помощью линейных оптических элементов	Yamamoto Y.	5
72	Stony Brook State University of New York, США	Теория построения кубитов на сверхпроводниковых элементах	Д. В. Аверин и К. К. Лихарев	7
73	Stony Brook State University of New York, США	Сверхпроводниковые кубиты на скивидах	Lukens, К. К. Лихарев и В. Г. Семенов	7
74	Stony Brook State University of New York, США	Сверхпроводниковые зарядовые кубиты	К. К. Лихарев	7
75	Torino, Италия	Теория построения твердотельных конструкций квантовых компьютеров	Rossi F.	6
76	TRW, США	Сверхпроводниковые кубиты на скивидах	Ladizinsky	7
77	UMBC, Maryland, США	Квантовые операции с помощью линейных оптических элементов	Shih Y. H.	5
78	University of Illinois, Urbana-Champaign, США	Квантовые операции с помощью линейных оптических элементов	Kwiat P. G.	5
79	University of Aarhus, Дания	Кубиты на основе ионов Ca ⁺ в ловушке	Drewsen M.	2
80	University of Aarhus, Дания	Теория построения квантовых компьютеров на нейтральных атомах	Mølmer K.	3
81	University of Arizona, Tucson, США	Оптические решетки	Jessen P. S.	3
82	University of Basel, Швейцария	Теория построения кубитов на сверхпроводниковых элементах	Brunder C.	7
83	University of Basel, Швейцария	Теория построения твердотельных конструкций квантовых компьютеров	Loss D.	6
84	University of Bonn, Германия	Квантовые операции на одиночных атомах Cs в микрорезонаторах	Meschede D.	4
85	University of Bonn, Германия	Ловушки для одиночных атомов	Meschede D.	3
86	University of Bristol, Великобритания	Квантовые операции с помощью линейных оптических элементов	Rarity J.	5
87	University of Bristol, Великобритания	Квантовые операции с помощью линейных оптических элементов	John Rarity (координатор в рамках программы EC (RAMBOQ))	5
88	University of California, Berkeley, США	Магнитные микроловушки/квантовые операции на одиночных атомах в микрорезонаторах	Stamper-Kurn D.	3
89	University of California, Berkeley, США	Теория построения твердотельных конструкций квантовых компьютеров	Whaley B.	6
90	University of California, Berkeley, США	Системы на основе ридбергских атомов	Stamper-Kurn D.	4
91	University of California, Los Angeles, США	Кубиты на атомах фосфора ³¹ P в бесспиновом моноизотопном кристалле кремния ²⁸ Si	Yablonovich E.	6
92	University of California, Santa Barbara, США	Квантовые операции с помощью линейных оптических элементов	Imamoglu A.	5
93	University of California, Santa Barbara, США	Теория построения твердотельных конструкций квантовых компьютеров	Sham L. J.	6
94	University of California, Santa Barbara, США	Фазочувствительные сверхпроводниковые структуры (сверхпроводниковые фазовые кубиты)	Martinis	7
95	University of California, Santa Barbara, США	Квантовые операции с помощью линейных оптических элементов	Bouwmeester D.	5
96	University of California, Santa Barbara, США	Спиновые системы в GaAs, экситонные кубиты (на основе переходов между состояниями экситона)	Awschalom D.	6
97	University of Cambridge, Великобритания	Квантовые вычисления на электронах, захваченных поверхностной акустической волной, Na в Si	Pepper M.	6
98	University of Catania, Италия	Теория построения кубитов на сверхпроводниковых элементах	Falci G.	7

№ по пор.	Научно-исследовательская организация, страна	Область исследований	Научный руководитель/(и) работ	№ НТН
99	University of Connecticut, Storrs, США	Теория построения квантовых компьютеров на нейтральных атомах	Cote R.	3
100	University of Connecticut, Storrs, США	Оптические ловушки для систем из ридбергских атомов	Gould P.	3
101	University of Geneva, Швейцария	Квантовые операции с помощью линейных оптических элементов	Gisin N.	5
102	University of Hamburg, Германия	Кубиты на основе ионов Yb ⁺ в ловушке	Wunderlich C.	2
103	University of Hannover, Германия	Оптические ловушки на основе оптических микроструктур	Ertmer W. и Birkel G.	3
104	University of Heidelberg, Германия	Магнитные микроловушки для квантовых компьютеров на нейтральных атомах	Schmiedmayer J.	3
105	University of Illinois at Urbana-Champaign, США	Сверхпроводниковые кубиты на сквидах	van Harlingen	7
106	University of Illinois at Urbana-Champaign, США	Кубиты на атомах фосфора ³¹ P в кристалле кремния ²⁸ Si	Tucker J.	6
107	University of Innsbruck, Австрия	Кубиты на основе ионов Ca ⁺ в ловушке	Blatt R.	2
108	University of Innsbruck, Австрия	Теория построения квантовых компьютеров на нейтральных атомах	Zoller P. и Briegel H. J.	3
109	University of Innsbruck, Австрия	Кубиты на основе ионов Ca ⁺ в ловушке	Blatt R.	4
110	University of Kansas, Lawrence, США	Сверхпроводниковые кубиты на сквидах и фазовые кубиты	Han Siyuan	7
111	University of Karlsruhe, Германия	Теория построения кубитов на сверхпроводниковых мезоструктурах	Schön, Shnirman и Makhlin	7
112	University of Mainz, Германия	Магнитные микроловушки для квантовых компьютеров на нейтральных атомах	Reichel J.	3
113	University of Maryland, Laboratory for Physical Sciences (LPS), США	Сверхпроводниковые зарядовые кубиты	Manheimer M.	7
114	University of Maryland, США	Кубиты на электронах в полупроводниковых (GaAs) квантовых точках	Webb R.	6
115	University of Maryland, США	Теория создания твердотельных конструкций квантовых компьютеров	Das Sarma S.	6
116	University of Maryland, США	Кубиты на атомах фосфора ³¹ P в бесспиновом моноизотопном кристалле кремния ²⁸ Si	Kane B.	6
117	University of Maryland, США	Сверхпроводниковые кубиты на сквидах и сверхпроводниковые фазовые кубиты	Wellstood, Anderson и Lobb	7
118	University of Maryland, США	Системы из ридбергских атомов	Orozco L.	4
119	University of Michigan, США	Экситоны в квантовых точках	Steel D.	6
120	University of Michigan, США	Кубиты на основе ионов Cd ⁺ в ловушке	Monroe C.	2
121	University of Michigan, США и NEC/RIKEN, Япония	Теория сверхпроводниковых кубитов	Nori F.	7
122	University of Munich, Германия	Теория построения кубитов на сверхпроводниковых мезоструктурах	Wilhelm	7
123	University of Munich, Германия	Квантовый компьютер на основе линейных оптических элементов	Weinfurter H.	5
124	University of Munich, Германия	Кубиты на электронах в полупроводниковых (GaAs) квантовых точках	Kotthaus J.	6
125	University of New Mexico, США	Теория построения квантовых компьютеров на нейтральных атомах	Deutsch I. H.	3
126	University of New South Wales, Великобритания	Кубиты на атомах фосфора ³¹ P в кристалле кремния ²⁸ Si	Clark R.	6
127	University of Oregon, США	Квантовые точки в микрополостях (микроканалах)	Raymer M.	6
128	University of Oxford, Великобритания	Кубиты на основе ионов Ca ⁺ в ловушке	Steane A.	2
129	University of Oxford, Великобритания	ЯМР-квантовый компьютер	Jones	1
130	University of Oxford, Великобритания	Квантовые операции с помощью линейных оптических элементов	Walmsley I.	5
131	University of Pisa, Италия	Теория построения кубитов на сверхпроводниковых элементах	Fazio R.	7
132	University of Pittsburgh, США	Кубиты на электронах в полупроводниковых (Si/Ge) квантовых точках	Levy J.	6
133	University of Queensland, Brisbane, Австралия	Квантовые операции с помощью линейных оптических элементов	White A. G.	5
134	University of Queensland, Brisbane, Австралия	Квантовые операции с помощью линейных оптических элементов	Milburn G. J. и Ralph T. C.	5
135	University of Rochester, New York, США	Квантовые операции с помощью линейных оптических элементов	Howell J. C.	5

№ по пор.	Научно-исследовательская организация, страна	Область исследований	Научный руководитель/(и) работ	№ НТН
136	University of Rochester, США	Сверхпроводниковые кубиты на скивидах	Feldman M. и Bocko M.	7
137	University of Science and Technology, КНР	ЯМР-квантовый компьютер	Chen Zeng-Bing	1
138	University of Tokyo, Япония	Системы из ридбергских атомов	Kuga T.	4
139	University of Tokyo, Япония	Кубиты на электронах в полупроводниковых (GaAs) квантовых точках	Tarucha S.	6
140	University of Tokyo, Япония	Квантовые операции с помощью линейных оптических элементов	Steinberg A.	5
141	University of Vienna, Австрия	Квантовые операции с помощью линейных оптических элементов	Zeilinger A.	5
142	University of Waterloo, Канада	ЯМР-квантовый компьютер	Laflamme R.	1
143	University of Wisconsin (координатор), США	Кубиты на электронах в полупроводниковых (Si/Ge) квантовых точках		6
144	University of Wisconsin, Madison, США	Оптические ловушки для систем ридбергских атомов	Saffman M. и Walker T. G.	3
145	Yale University, США	Электронный спиновой (электронный парамагнитный) резонанс в полупроводниковых структурах	Barrett S.	6
146	Yale University, США	Обнаружение куперовской пары в кубите с использованием радиочастотного одноэлектронного транзистора	Schoelkopf R.	6
147	Yale University, США	Сверхпроводниковые зарядовые кубиты	Devoret	7
148	Yale University, США	Сверхпроводниковые зарядовые кубиты	Schoelkopf	7

Проведенный анализ результатов систематизации планов и проектов зарубежных исследований и разработок позволил сформировать краткий

прогноз развития квантовых компьютеров за рубежом на период до 2010—2015 гг. Основные результаты этого прогноза представлены в табл. 3.

Таблица 3

Краткий прогноз развития квантовых компьютеров до 2015 года

№ по пор.	Вариант построения квантового компьютера (условное название схемы, реализующей механизмы квантовых вычислений)	Состояние		
		На 01.01.2006 г.	К 2010 г.	К 2012—2015 гг.
1	Квантовый компьютер, основанный на состояниях ядерных спинов в молекулярных жидкостях	Создан ансамблевый компьютер на молекулах в жидкости с числом физических кубитов, равным 7. Доказано, что существует принципиальное ограничение на предельное число кубитов ~10—15. Продемонстрированы возможности реализации отдельных алгоритмов. Работы проводятся в США, Германии, Индии, Южной Корее, Великобритании, КНР и Канаде	Построение квантовых вычислительных систем с числом физических кубитов до 10. Демонстрация операций с числом логических кубитов от 3 до 7	Демонстрация квантовых компьютеров с числом логических кубитов от 3 до 10. Отработанные оптические схемы управления состояниями
2	Компьютеры на ионах в ловушках	Создан компьютер с числом кубитов, равным 2 (двухкубитная фазовая операция—операция "контролируемое НЕ"). Разработаны технологии, позволяющие осуществлять: приготовление исходного состояния, хранение данных ("квантовая память") и считывание результатов. Исследуются состояния ионов ${}^9\text{Be}^+$, Ba^+ , Sr^+ , Mg^+ , In^+ , Ca^+ , Yb^+ , Cd в ловушках. Принципиальное ограничение ~20 кубитов. Ведется интенсивная разработка эффективных источников одиночных фотонов. Работы проводятся в США, Германии, Канаде, Великобритании, Дании, Австрии	Создание лазеров с высокой стабильностью частоты и интенсивности излучения. Уменьшение погрешности квантовых вычислений до 10^{-4} — 10^{-5} . Время сохранения когерентности логического кубита (например, 2 физических кубита) более 100 с (квантовая память)	—
3	Квантовый компьютер на нейтральных атомах	Исследуются вопросы реализации квантовых операций на одиночных атомах в микрорезонаторах. Отрабатываются вопросы создания оптических и магнитных микроловушек. Принципиальное ограничение ~20 кубитов. Работы проводятся в США, Франции, Германии, Дании, Австрии	Применимые для практического использования магнитные и оптические микроловушки (для систем ридбергских атомов)	—

№ по пор.	Вариант построения квантового компьютера (условное название схемы, реализующей механизмы квантовых вычислений)	Состояние		
		На 01.01.2006 г.	К 2010 г.	К 2012—2015 гг.
4	Квантовые операции на одиночных атомах в микрорезонаторах (квантовая оптика резонансных явлений cavity QED)	Эксперименты в этом направлении реализации квантового компьютера, по сути, объединяются с экспериментальными исследованиями в области квантовой оптики	Нелинейный оптический элемент, осуществляющий достаточно сильное взаимодействие фотонных кубитов	—
5	Квантовые компьютеры на основе линейных оптических элементов (реализация квантовых операций с помощью линейных оптически элементов "оптический квантовый компьютер")	Разработана схема построения одного кубита. Предельное число кубитов в квантовом оптическом компьютере является предметом многочисленных исследований. Работы ведутся в научно-исследовательских организациях США, Японии, Италии, Великобритании, Швейцарии, Германии, Австралии, Канады, Австрии	—	—
6	Твердотельные конструкции квантовых компьютеров	Созданы следующие конструкции кубитов: • кубиты на атомах фосфора ^{31}P в бесспиновом моноизотопном кристалле кремния ^{28}Si (1 кубит); • кубиты на электронах в полупроводниковых (GaAs или Si/Ge) квантовых точках (2 кубита). Предельное число кубитов >1000 . Работы ведутся в США, Швейцарии, Японии, Канаде, Италии, Великобритании, Германии	Появление экспериментальных схем с числом кубитов более 10. Интеграция электронных схем управления с твердотельными конструкциями кубитов. Новые подходы к построению схем коррекции ошибок (для каждого варианта построения кубита)	Возможно появление твердотельной конструкции с числом кубитов более 30
7	Квантовые компьютеры на сверхпроводниковых элементах	Созданы научные основы для разработки квантовых компьютеров на сверхпроводниковых элементах двух типов: • сверхпроводниковые зарядовые кубиты (charge-based qubits). Создано 2 кубита; • сверхпроводниковые кубиты на скин-эффектах (flux-based qubits — кубиты-флюксиды). Создано 2 кубита. Доказано, что предельное число кубитов в квантовом компьютере на сверхпроводниковых элементах может превышать 1000. Разработаны (впервые) принципы построения сверхпроводникового компьютера на π -контактах в ВТСП пленках (ФТИАН). Исследования и разработки проводятся в США, Швеции, Франции, Нидерландах, Японии, Германии, Италии, Южной Кореи, Швейцарии	Новые подходы к организации взаимодействия между зарядовыми кубитами, решение отдельных проблем декогерентизации. Выбор рациональных (пригодных для масштабирования) схем построения кубитов. Варианты построения квантового компьютера из 10—100 кубитов. Работоспособные экспериментальные установки, реализующие механизмы квантовых вычислений на трех и более логических кубитах. Схемы измерений и управления для компьютеров с числом кубитов ~ 20 —30	Повышение достоверности квантовых вычислений — уменьшение шумов, новые схемы измерений состояний кубитов. Возможно появление работоспособного гибридного квантового компьютера с числом логических кубитов 20—30
8	Квантовые компьютеры на основе других ("уникальных") принципов построения кубитов	Разработано несколько уникальных принципов построения физических кубитов. Проводятся экспериментальные исследования		

В заключение следует отметить, что в настоящее время большое число наших соотечественников возглавляют зарубежные научные школы и направления работ по созданию квантовых компьютеров. В подтверждение этому факту можно привести несколько следующих примеров.

- Юрий Мамин — сотрудник исследовательского центра IBM, США. Еще в 1980 г. Мамин Ю. высказал предположение, что "квантовый шум", который в ходе миниатюризации микросхем неизбежно превратится в препятствие для их нормальной работы, можно попытаться использовать для конструирования компьютеров

нового типа, считающих по новым "квантовым" алгоритмам. Тогда странная идея молодого ученого не вызвала в научном сообществе особого энтузиазма, но когда через два года о заманчивых перспективах "квантовых вычислений" заговорил такой авторитет, как Ричард Фейнман, исследователи стали проявлять к новой области повышенный интерес. Фейнман, грубо говоря, показал, что один квантовый компьютер (цепочка квантовых битов) сможет работать как комбинация очень большого числа классических компьютеров, проводящих вычисления одновременно.

- Китаев А. (Microsoft Corp, США). Ему удалось обобщить шоровский алгоритм, а уже через два

года коллега Шора по Bell Labs Лов Гровер показал, что квантовые вычисления гораздо эффективнее классических не только при взломе шифров, но и при поиске в неупорядоченных базах данных.

- Пашкин Ю. (Japan Science and Technology Corporation, Япония, а в прошлом научный сотрудник ФИАН) совместно с Йошико Накамура и Джан Цай (оба из NEC Fundamental Research Laboratories) изготовили кубит на основе джозефсоновского контакта (тонкий слой диэлектрика, разделяющий два сверхпроводника и пропускающий ток).
- Сергиенко А. В. (Boston University, Massachusetts, США). Область работ — квантовые операции с помощью линейных оптических элементов.
- Лукин М. С. (Harvard, Massachusetts, США). Область работ — теория построения квантовых компьютеров на нейтральных атомах.
- Левитов Л. С. (MIT, США). Область работ — теория построения кубитов на сверхпроводниковых мезоструктурах.
- Устинов А. В. (Physikalisches Institut III Universität Erlangen-Nürnberg, Германия). Область работ — сверхпроводниковые кубиты на скиндах.
- Аверин Д. В. и Лихарев К. К. (Stony Brook State University of New York, США). Область работ — теория построения кубитов на сверхпроводниковых элементах (сверхпроводниковые кубиты на скиндах и сверхпроводниковые зарядовые кубиты).

Любопытен и еще один факт, связанный с работой нашего соотечественника в области создания квантового компьютера. Так, 13 февраля 2007 г. канадская компания *D-Wave Systems* (г. Ванкувер) объявила о создании и демонстрации работы первого в мире "коммерческого" устройства, реализующего механизмы квантовых вычислений (т. е. квантового компьютера). Руководством этой компании было амбициозно заявлено, что к настоящему времени создан компьютер "Орион", состоящий из 16 кубитов, а к концу 2008 г. его планируют довести ("промасштабировать") до 1024 кубитов. При этом сообщается, что квантовый компьютер создан на сверхпроводящих твердотельных элементах (рис. 2, см. вторую сторону обложки) и способен решать задачи поиска в неупорядоченной базе данных и находить оптимальное решение задач методом перебора.

К настоящему времени ученые в области квантовых информационных технологий скептически (от сдержанного пессимизма до резкого неприятия) относятся к заявлениям компании *D-Wave Systems*. Большие вопросы возникают к способам решения компанией таких проблем, как декогерентность, ввод и считывание данных, взаимодействие между кубитами и ее контролируемость.

Отчасти скептицизм к сенсационным заявлениям вызван и следующими обстоятельствами:

- одним из директоров фирмы является Алексей Андреев (канд. физ.-мат. наук, закончил аспирантуру Московского института стали и сплавов, бывший сотрудник Института спектроскопии РАН (г. Троицк, МО), инвестициями в сфере высоких технологий начал заниматься еще в России);
- заключенный фирмой *D-Wave Systems* контракт на разработку квантового компьютера, стоимостью в 14 млн долл. и выплаченных в мае 2006 г., предполагающий "авантюрно-прорывные достижения", например, компьютер из 32 кубитов к концу 2007 г.

Список литературы

1. **Валиев К. А.** Квантовые компьютеры и квантовые вычисления // Успехи физических наук, 2005. Т. 175. № 1. С. 3—39.
2. **Валиев К. А., Кокин А. А.** Квантовые компьютеры: надежды и реальность. Регулярная и хаотическая динамика (РХД) М.-Ижевск. 2001. 350 с.
3. **Quantum Information Processing and Communication** // Strategic report on current status, visions and goals for research in Europe. April 2005. 62 p.
4. **Alves P. R., Siegle R., Johnston R. N. and Jamieson D. N.** Ion beam lithography using single ions // Nuclear Instruments and Methods. 2006. В 249. 730 p.
5. **Hollenberg L. C. L., Wellard C. J. and Greentree A. D.** Computational modelling of donor-based quantum computer architectures in silicon // Invited Review Article, Handbook of Theoretical and Computational Nanotechnology, American Scientific Publishers. 2006.
6. **Mancini S., Man'ko V. I. and Wiseman H. M.** Special issue on quantum control // Journal of Optics B (Editorial). 2005. 7. P. 177.
7. **Bellac Le M. A.** Short Introduction to Quantum Information and Quantum Computation. Cambridge. 2006.
8. **Nielsen M. A. and Chuang I. L.** Quantum Computation and Quantum Information. Cambridge & Hall. 2000.
9. **Chen G.** et al. Quantum Computing Devices // Principles, Designs, and Analysis Chapman & Hall. 2006.
10. **Quantum Information Processing Interdisciplinary Research Collaboration Annual Report 2005—2006, Interim Report 2005—2006, QIP IRC, Department of Materials, University of Oxford, UK. 19 p.**

НАНОТЕХНОЛОГИИ И ЗОНДОВАЯ МИКРОСКОПИЯ

УДК 621.38

С. Г. Бобков, канд. техн. наук,
В. Ю. Киреев, д-р техн. наук,
НИИ системных исследований РАН, г. Москва

ПРОБЛЕМЫ ПЕРЕХОДА МИКРОЭЛЕКТРОНИКИ В СУБСТАНАНОМЕТРОВУЮ ОБЛАСТЬ РАЗМЕРОВ

Часть 1. Общие положения и возможности литографических и нелитографических методов формирования топологии

Показаны тенденции развития производства интегральных микросхем, систематизированы и приведены их параметрические и стоимостные оценки. Даны рекомендации по стратегии развития микроэлектроники в России в целях минимизации производственных затрат и обеспечения информационной безопасности разработок микросхем.

Проанализированы современные нелитографические и литографические методы формирования топологии микросхем, показаны их возможности, ограничения и области применения.

В настоящее время микроэлектроника является катализатором научно-технического прогресса для всех важнейших отраслей народного хозяйства

ва, а уровень развития и объемы производства ее основных изделий — интегральных микросхем (ИМС) — во многом определяет культурный, экономический и оборонный потенциалы страны. Недаром современное яркое и наглядное определение передовой в научном и техническом развитии страны представляет ее как страну, способную массово производить мощные персональные компьютеры и компьютерные системы (станции) на собственных (изготовленных в стране) ИМС [1].

Развитие компьютерной техники, систем управления и средств связи непрерывно стимулирует спрос на кремниевые ИМС с высокой степенью интеграции (СБИС и УБИС — сверхбольшие и ультрабольшие интегральные схемы). Наиболее массовыми видами таких высокоинтегрированных микросхем, производимых по основной в микроэлектронике КМОП-технологии на основе комплементарных (дополняющих) полевых МОП (металл — оксид — полупроводник) транзисторов, являются:

- запоминающие устройства (ЗУ), особенно динамические оперативные запоминающие устройства (ДОЗУ) (DRAM — dynamic random access memory);
- логические микросхемы, особенно микропроцессоры (МП) (MPU — microprocessor unit).

В настоящее время минимальные размеры элементов высокосоввершенных МП и ДОЗУ определяют уровень технологии (УТ) микроэлектроники, достигнутый страной (табл. 1) [1—3].

Таблица 1

Тенденции развития КМОП-технологии на примере высокосоввершенных ДОЗУ и МП (состояние на 2006 г.)

Характеристика	Уровень технологии, нм									
	500	350	250	180	130	90	65	45	32	22
Год введения уровня технологии в массовое производство	1992	1994	1997	1999	2001	2004	2007	2010	2013	2016
Минимальный размер элемента изделия, нм:										
• ДОЗУ (размер линий 1-го уровня разводки)	500	350	250	180	130	90	65	45	32	22
• МП (литографическая длина затворов)	350	250	180	130	90	60	42	30	21	13
• МП (физическая длина затворов)	300	200	150	100	65	37	25	18	13	8
Функциональные возможности изделия на стадии массового производства на кристалл:										
• ДОЗУ (информационная емкость, Мбит)	4	16	64	256	512	$1 \cdot 10^3$	$4 \cdot 10^3$	$8 \cdot 10^3$	$16 \cdot 10^3$	$32 \cdot 10^3$
• МП (число транзисторов, млн шт.)	13	21	52,8	108	276	553	$1,1 \cdot 10^3$	$2,2 \cdot 10^3$	$4,4 \cdot 10^3$	$8,8 \cdot 10^3$

Характеристика	Уровень технологии, нм									
	500	350	250	180	130	90	65	45	32	22
Быстродействие изделия:										
· ДОЗУ (время выборки, нс)	45	40	35	30	25	20	15	10	5	1
· МП (рабочая частота, МГц)	166	300	600	$1,2 \cdot 10^3$	$1,7 \cdot 10^3$	$3,0 \cdot 10^3$	$4,9 \cdot 10^3$	$9,5 \cdot 10^3$	$18 \cdot 10^3$	$36 \cdot 10^3$
Напряжение питания изделия, В	3,5—5,0	2,5—3,5	1,8—2,5	1,5—1,8	1,2—1,5	0,9—1,2	0,8—1,1	0,7—1,0	0,6—0,9	0,5—0,8
Максимальная рассеиваемая мощность корпусированного изделия, Вт:										
· МП										
· Сетевая настольная аппаратура с радиатором	46	56	70	90	130	160	190	198	198	198
· Батарейная ручная аппаратура	0,8	0,9	1,2	1,4	2,4	2,8	3,0	3,0	3,0	3,0
· ДОЗУ	0,2	0,3	0,5	0,8	1,4	2,0	2,5	3,0	3,0	3,0
Среднее число литографий (литографических циклов) в маршруте изготовления изделия, шт.:										
· ДОЗУ	18	18	19	20	21	24	24	26	26	26
· МП	18	21	22	23	25	31	33	35	37	39
Среднее число операций в маршруте изготовления изделия, шт.:										
· ДОЗУ	350	350	380	410	440	530	530	590	590	620
· МП	350	440	470	500	560	620	680	710	740	770
Число слоев металлизации (разводки) изделия, шт.:										
· ДОЗУ	2—3	3	3	3—4	4	4	4—5	5	5—6	6
· МП	3—4	4—5	5—6	6—7	7—9	10—12	11—15	12—16	13—17	13—17
Максимальный размер литографического поля:										
· площадь, см ²	4,84	4,84	4,84	8,00	8,00	8,58	8,58	8,58	8,58	8,58
· длина × ширина, мм	22 × 22	22 × 22	22 × 22	32 × 25	32 × 25	33 × 26	33 × 26	33 × 26	33 × 26	33 × 26
Эквивалентная толщина подзатворного оксида, нм	10—12	5—7	3—5	2—3	1,3—1,6	1,2—1,4	0,9—1,1	0,5—0,8	0,4—0,6	0,4—0,5
Максимальный диаметр пластины, на которой формируются кристаллы изделия, мм	200	200	200	200	300	300	300	300	450	450
Размер краевой нерабочей зоны на пластине, мм	3	3	3	3	2	2	1,5	1,5	1,5	1,5
Размер губительного (критического) дефекта изделия d_c , нм	220	150	125	90	65	45	33	23	16	11
Площадь кристалла изделия на стадии массового производства A , см ² :										
· ДОЗУ	0,22	0,36	0,53	0,74	1,27	1,10	1,10	0,93	0,93	0,93
· МП	2,00	2,65	3,98	4,50	3,10	3,10	3,10	3,10	3,10	3,10
Критическая площадь изделия A_c на стадии массового производства, поражаемая губительными дефектами, % от площади кристалла:										
· ДОЗУ	37	37	37	37	37	37	37	44	44	44
· МП	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100
Допустимая плотность электрически значимых дефектов с размером $d \geq d_c$ на кристалле на все операции технологического маршрута для стадии массового производства изделий D_e , дефект/м ² :										
· ДОЗУ	$2,1 \cdot 10^3$	$1,3 \cdot 10^3$	8465	6270	3602	4143	4143	4143	4143	4143
· МП	1547	1168	777	688	998	998	998	998	998	998
Допустимая плотность случайных дефектов с размером $d \geq d_c$ на кристалле на все операции технологического маршрута для стадии массового производства изделий D_r , дефект/м ² :										
· ДОЗУ	$1,4 \cdot 10^3$	8769	5700	4222	2426	2791	2791	2791	2791	2791
· МП	976	737	491	434	630	630	630	630	630	630
Допустимая удельная стоимость готового изделия для стадии массового производства:										
· ДОЗУ, микроцент/бит	170	86	28	15	7,7	2,7	0,96	0,34	0,12	0,04
· МП, микроцент/транзистор	$2,5 \cdot 10^3$	$1,3 \cdot 10^3$	470	245	97	34	12,2	4,3	1,5	0,54

Характеристика	Уровень технологии, нм									
	500	350	250	180	130	90	65	45	32	22
Число выводов корпуса изделия, шт.:										
ДОЗУ										
• максимальное	80	96	112	128	144	160	182	200	224	250
• минимальное	28	32	36	44	48	52	56	60	64	68
МП										
• максимальное	358	440	600	740	810	900	1088	1450	1930	2568
• минимальное	170	208	256	350	480	550	600	660	800	880
Стоимость корпусирования изделия, цент/вывод:										
ДОЗУ										
• максимальная	3,94	3,20	2,34	1,90	1,54	0,51	0,48	0,45	0,41	0,37
• минимальная	0,56	0,51	0,44	0,40	0,36	0,28	0,25	0,22	0,20	0,19
МП										
• максимальная	3,89	3,51	2,11	1,90	1,60	1,17	1,05	0,94	0,89	0,85
• минимальная	1,33	1,21	1,04	0,90	0,80	0,66	0,64	0,61	0,57	0,54
Стоимость тестера для тестирования изделия, тыс. долл./вывод:										
• максимальная	10	10	10	8,0	4,0	3,0	3,0	4,0	5,0	5,0
• минимальная	3	3	3	2,4	1,0	1,0	1,0	2,0	3,0	3,0
<p>Примечания. 1. Средний съем кристаллов с пластины определяется произведением выхода годных кристаллов с пластины, определяемого случайными дефектами $Y_{кр}^{пл}(D)$, на выход годных кристаллов с пластины, определяемый систематическим браком $Y_{кр}^{пл}(\delta)$:</p> $Y_{кр}^{пл} = Y_{кр}^{пл}(D) Y_{кр}^{пл}(\delta).$ <p>2. Плотность электрически значимых дефектов на кристалл рассчитывается по формуле</p> $D_e = \{\alpha/A_c\} \{(1/Y_{кр}^{пл})^{1/\alpha} - 1\},$ <p>где для ДОЗУ $\alpha = 2$; $Y_{кр}^{пл} = 85\%$; для МП $\alpha = 2$; $Y_{кр}^{пл} = 75\%$ и A_c — критическая площадь изделия.</p> <p>3. Плотность случайных дефектов на кристалл рассчитывается по формуле</p> $D_r = \{\alpha/A_c\} \{(1/Y_{кр}^{пл}(D))^{1/\alpha} - 1\},$ <p>где для ДОЗУ $\alpha = 2$; $Y_{кр}^{пл}(D) = 89,5\%$; $Y_{кр}^{пл}(\delta) = 95\%$, а для МП $\alpha = 2$; $Y_{кр}^{пл}(D) = 83\%$; $Y_{кр}^{пл}(\delta) = 90\%$.</p>										

Если СССР поддерживал паритет в развитии микроэлектроники, отставая от мировых лидеров США и Японии к 1992 г. всего на один уровень технологии (УТ 800 нм против УТ 500 нм) или на 3—4 года по временным меркам, то Россия из-за политических и экономических потрясений практически выпала из этого процесса, во многом перейдя на импортную микроэлектронную комплектацию [3, 4].

За последние пятнадцать лет ведущие страны мира, переходя последовательно от одного уровня технологии микросхем к другому, достигли в 2004 г. УТ 90 нм и, несомненно, достигнут УТ 65 нм в 2007 г. (см. табл. 1), увеличив отставание России до 20 лет.

За эти годы в мировой микроэлектронике на основе проведенных научно-исследовательских работ и подготовки соответствующих специалистов сменилось несколько поколений технологического и контрольно-измерительного оборудования для проведения операций производства ИМС, несколько раз повышались требования к чистоте используемых на этих операциях материалов и реагентов, было разработано много новых технологических операций и введено много новых материалов в конструкцию микросхем.

Однако обеспечение безопасности страны требует провести замену или модернизацию физически и морально устаревших устройств автоматизации и идентификации, систем и средств связи, управления и контроля, а также программных продуктов к ним и, в первую очередь, для транспорта, опасных промышленных производств и финансово-экономических структур.

Необходимость выполнения этих требований все более настоятельно подталкивают Россию к развитию собственной микроэлектронной отрасли и к скорейшему достижению современного уровня технологии. Предложения по стратегическим направлениям такого развития высказывают ведущие ученые [5], руководители микроэлектронных заводов и отраслей промышленности [4, 6, 7].

В настоящей работе предпринята попытка конкретизировать некоторые вопросы развития микроэлектроники на основании опыта эксплуатации пилотной производственной линейки и анализа возможностей процессов литографии, как движущей силы масштабирования ИМС при переходе в субнанометровую область размеров.

Прямой подход к развитию микроэлектроники связан с закупкой современной фабрики для про-

изводства микросхем с УТ 90 нм и месячным выпуском в 50 тыс. трехсотмиллиметровых пластин. С учетом данных табл. 2 [8—10] и практического критерия, что стоимость основного (технологического и метрологического) оборудования составляет 75 % стоимости современного производства [2, 11], цена такой фабрики составит около 5 млрд долл.

Такая фабрика будет оснащена только зару-

бежным оборудованием для поддержания параметров инфраструктуры и специальным технологическим и контрольно-измерительным, будет работать только на зарубежных материалах и реагентах, потреблять импортные комплектующие и обслуживаться по главным проблемам зарубежными специалистами, обеспечивая обучение отечественных кадров по всем перечисленным направлениям.

Таблица 2

Сравнительные параметры заводов для массового производства микросхем и минифабрик для различных уровней технологии (состояние на 2006 г.)

Характеристика	Уровень технологии, нм									
	500	350	250	180	130	90	65	45	32	22
Год введения уровня технологии в массовое производство	1992	1994	1997	1999	2001	2004	2007	2010	2013	2016
Средняя стоимость, млн долл.:										
• завода для производства изделия с месячным запуском 25 000 пластин (далее завод)	600	800	1200	1500	2000	3000	4500	6700	8700	10 250
• минифабрики для производства изделия с месячным запуском 250 пластин (далее минифабрика)	60	72	94	113	136	180	240	320	420	550
Средняя стоимость основного производственного (процессного и контрольно-измерительного) оборудования, млн долл.:										
• завода	450	600	900	1125	1500	2250	3375	5025	6530	7690
• минифабрики	45	54	71	85	102	135	180	240	315	410
Средняя стоимость зданий, помещений и вспомогательного оборудования инфраструктуры, млн долл.:										
• завода	90	120	180	225	300	450	675	1000	1300	1540
• минифабрики	9,0	11	14	17	20	27	36	48	63	82
Средняя стоимость инсталляции и квалификации основного производственного оборудования, млн долл.:										
• завода	36	48	63	78	120	180	240	350	520	540
• минифабрики	4,5	4,5	5,0	5,1	7,2	10,8	12,6	16,8	25,2	28,7
Средняя стоимость оборудования для хранения, транспортировки и перегрузки пластин и фотошаблонов, млн долл.:										
• завода	12	16	27	36	40	60	120	165	175	240
• минифабрики	1,2	1,4	2,0	3,0	3,4	3,6	6,0	7,6	8,4	15
Средняя стоимость информационной системы управления и контроля производственным процессом, млн. долл.:										
• завода	12	16	30	36	40	60	90	160	175	240
• минифабрики	0,8	1,1	2,0	2,9	3,4	3,6	5,4	7,6	8,4	14,3
Среднее время от начала строительства до запуска первой партии, мес.:										
• для завода	25	23	21	18	15	13,5	12	11,5	11	9,5
• для минифабрики	12	11	10	9,0	8,0	7,5	7,0	6,5	6,0	5,5
Среднее время, затрачиваемое на обработку обычной партии по одному литографическому циклу, дни:										
• на заводе	1,90	1,85	1,80	1,75	1,70	1,60	1,50	1,40	1,20	1,13
• на минифабрике	0,50	0,47	0,44	0,41	0,38	0,35	0,32	0,31	0,30	0,30
Длительность цикла изготовления микропроцессоров (МП) (по данным табл. 1), дни:										
• на заводе	34,2	38,9	39,6	40,3	42,5	49,6	49,5	49,0	44,4	44,1
• на минифабрике	9,0	9,9	9,7	9,5	9,5	10,9	10,6	10,9	11,1	11,7
Средняя выработка (производительность труда) операторского персонала, число сформированных литографических слоев на пластинах в день на человека:										
• на заводе	33	37	41	45	50	55	61	67	73	81
• на минифабрике	30	33	36	39	42	46	50	54	58	63

Характеристика	Уровень технологии, нм									
	500	350	250	180	130	90	65	45	32	22
Среднее отношение используемых непроизводственных пластин к производственным пластинам, %:										
• на заводе	20	18	17	15	12	10	7,0	5,0	5,0	5,0
• на минифабрике	40	38	35	32	29	26	23	20	20	20
Среднее отношение площади чистых производственных помещений к месячному запуску пластин, м ² /пластин в месяц:										
• на заводе	0,50	0,46	0,43	0,40	0,38	0,34	0,34	0,34	0,34	0,34
• на минифабрике	1,50	1,40	1,30	1,20	1,10	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
Класс чистых производственных помещений, согласно ISO14644 и Fed. Std. 209E:										
• на заводе	3–5 1–100	3–5 1–100	3–5 1–100	3–5 1–100	3–5 1–100	5–6 10 ² – 10 ³	5–6 10 ² – 10 ³	5–6 10 ² – 10 ³	6–7 10 ³ – 10 ⁴	6–7 10 ³ – 10 ⁴
• на минифабрике	5–6 10 ² – 10 ³	6–7 10 ³ – 10 ⁴								

Примечания. 1. В табл. 2, кроме информации из литературных источников [2, 8–11], использованы данные прогнозов (*roadmaps*) организации *Semiconductor Industry Association* за 1997–2004 гг., материалы и стандарты организации SEMATECH, а также данные НИИСИ РАН по минифабрике.

2. Завод производит большие объемы микросхем малой номенклатуры (*high volume/low mix factory*), обычно не более двух–трех типов, имеет соответственно 2–3 базовых технологических процессов (маршрутов). Число пластин в партии составляет не менее 25 шт. и они располагаются в одном носителе (кассете). На подавляющем большинстве технологических операций используется групповая обработка пластин (по 25 шт. и более). Узким местом по производительности являются установки проекционной фотолитографии (степеры), так как литография после жидкостной химической обработки является наиболее частой операцией в любом технологическом маршруте. При производительности степера в 90 пластин/ч, 18 литографиях в технологическом маршруте, 672 рабочих часах в месяц, коэффициентах готовности и использования степера соответственно 0,92 и 0,8 для обработки 25 000 пластин в месяц потребуется как минимум 10 степеров.

3. Минифабрика производит малые объемы микросхем большой номенклатуры (*low volume/high mix factory*), обычно до 50 типов, имеет не менее 10 базовых технологических процессов (маршрутов). Число пластин в партии составляет 1–10 шт., и они располагаются в одном носителе (кассете), который помещается в специальный контейнер малого объема (СМИФ-контейнер — SMIF-container) с высоким классом чистоты. На подавляющем большинстве технологических операций используется индивидуальная (поштучная) обработка пластин. В случае использования степера и установки жидкостной химии с поштучной обработкой пластин узким местом в маршрутах по производительности становится жидкостная химическая обработка.

4. Большая номенклатура изделий и маршрутов для минифабрики по сравнению с заводом увеличивает процент использования непроизводственных пластин, к которым относятся тестовые пластины, калибровочные пластины, пластины спутники (*monitor wafers*) и балластные (*dummy*) пластины для кондиционирования оборудования, и, следовательно, уменьшает среднюю выработку операторского персонала.

5. Площадь чистых помещений в среднем составляет 17 % площади производственных помещений завода и минифабрики; для ускорения времени строительства и запуска заводов и минифабрик в настоящее время используется модульный принцип строительства и инсталляции оборудования. Требования к классу чистых помещений постепенно снижаются по мере расширения использования миниконтейнеров, миникамер и минимодулей с высоким классом чистоты для хранения, транспортировки, переукладки, загрузки и обработки пластин.

6. Для требуемого повышения коэффициентов готовности и использования производственного оборудования с каждым уровнем технологии, а также ускорения и удешевления выхода завода или минифабрики на требуемые значения выхода годных изделий используются все более сложные информационные системы управления и контроля производственным процессом (*factory information and control system — FICS*).

Ведь фактически все базовые предприятия и научно-исследовательские институты по оснащению российской микроэлектроники оборудованием, материалами, реагентами и комплектующими недееспособны, а ведущие специалисты работают за рубежом. Восстановление разрушенной базы отечественной микроэлектроники и достижение ею мирового уровня потребуют сотни миллиардов долларов капиталовложений [4]. Фактически это будет аналогом закупки СССР Волжского автозавода (ВАЗ) в начале 1970-х годов, когда для обеспечения его комплектующими изделиями потребовалось создание и модернизация еще около 500 предприятий в различных отраслях промышленности.

С учетом закупок материалов, реагентов, полуфабрикатов, комплектующих, запасных частей, гарантийного обслуживания оборудования и стоимости незавершенного производства современная фабрика обойдется в 10 млрд долл. Естественно, что вкладывать такую огромную сумму без твердых гарантий сбыта огромного объема производимых изделий малой номенклатуры никто не будет, а такие гарантии в условиях жесткой конкуренции на мировых рынках изделий микроэлектроники может дать только государство, сформировав в России соответствующий внутренний спрос.

В противном случае создание такого производства целесообразно:

- либо на паях с ведущими мировыми компаниями, имеющими свою нишу в мировом рынке;
- либо при согласии руководства России какое-то время дотировать собственную микроэлектронику ради сохранения в стране интеллектуального потенциала, а не только нефтегазовых потребителей.

В настоящее время в России отсутствует потребность в массовом производстве микросхем [4—6], однако для эффективного функционирования ряда производств, особенно для систем контроля и управления технологическими процессами, требуется высоконадежная и эффективная аппаратура. Надежное и стабильное функционирование систем контроля и управления технологическими процессами, промышленным и специальным оборудованием в ряде случаев является составляющей безопасности страны. Это можно отнести к железнодорожному, авиационному и морскому транспорту, нефтегазовой отрасли, химическому производству, электростанциям, особенно атомным, и финансовым системам [12].

Такие производства требуют надежного функционирования аппаратуры на протяжении десятков лет, возможность осуществления в течение всего срока регламентных и ремонтных работ, модернизации аппаратуры без существенного изменения программного обеспечения. Потребность в микросхемах для таких областей промышленности в России составляет всего десятки тысяч штук в год. Учитывая быстрое развитие микроэлектроники, приводящее к смене базовых микросхем вычислительных узлов каждые три года, обеспечить промышленность такими объемами западных микросхем на протяжении всего срока эксплуатации аппаратуры очень сложно [12].

Поэтому гораздо более эффективным подходом к развитию микроэлектроники в российских условиях является создание мелкосерийных мини-фабрик (пилотных, прототипных производственных линеек) под конкретные задачи [13]. Стоимость таких мини-фабрик (мини-фабов) значительно ниже, чем серийных заводов (см. табл. 2), и они окупаются не за счет массового выпуска ИМС, а за счет высокой цены на оперативно разрабатываемые и выпускаемые специализированные микроэлектронные изделия для важнейших объектов, обеспечивающих решение задач государственной безопасности [12, 13].

Примером может служить мини-фабрика НИИСИ РАН на основе комплекта кластерного оборудования с поштучной обработкой 150 мм пластин и проекционной системой фотолитографии с длиной волны 365 нм, рассчитанная на проектную мощность в 100 тыс. микросхем в год и созданная для решения задачи информационной безопасности современных специализированных аппаратно-программных систем (платформ). Эта мини-фабрика обеспечивает производство специа-

лизированных микросхем, которые являются составной частью полного цикла изготовления аппаратно-программных платформ, включающего разработку конструкции и архитектуры систем, их программного обеспечения, а также сборку систем на печатных платах [12, 13].

Разработанные на производственной линейке НИИСИ РАН базовые маршруты (технологические процессы) для УТ 0,5 мкм и 0,35 мкм обеспечивают изготовление микропроцессоров, системных и периферийных контроллеров объемом до 5 млн транзисторов. В настоящее время на мини-фабрике производится около двух десятков различных типов логических микросхем, и их номенклатура непрерывно расширяется. Кроме того, мини-фабрика позволяет оперативно (за 10—15 дней) изготавливать перспективные разработки (см. табл. 2), отрабатывать современные технологические процессы и готовить кадры для промышленных заводов [12, 13].

На мини-фабрике НИИСИ РАН впервые в России были успешно отработаны и внедрены в производство процессы химико-механической планаризации (ХМП) (chemical mechanic planarization — CMP) пленок двуоксида кремния и вольфрама, а также процессы струйно-центрифужной очистки поверхности пластин в смесях озонированной воды и плавиковой кислоты.

Исторически микроэлектроника развивается в соответствии с законом Гордона Мура ("Moore's Law") [14], согласно которому функциональные возможности высокосовременных ДОЗУ (объем памяти или число ячеек памяти) и МП (число транзисторов и быстродействие) удваиваются каждые два года, обеспечивая при этом уменьшение стоимости на функцию (cost per function) на 25—29 % в год [2].

Первоначально Гордон Мур постулировал, что удвоение функциональных возможностей микросхем осуществляется за счет трех движущих факторов [15]:

- уменьшения минимального размера;
- увеличения площади кристалла;
- усовершенствования конструкции и топологии микросхемы.

Однако к началу XXI века возможности увеличения площади кристалла и усовершенствования конструкции ДОЗУ и МП исчерпались и остался только фактор уменьшения минимального размера (топологической нормы) [16].

Уровень любой технологии микроэлектроники определяется минимально возможной топологической нормой, т. е. минимальным размером элемента или зазора в регулярных структурах с минимальным периодом (с максимальной плотностью упаковки) $L_{\min} = 1/2 \text{ min pitch}$, который в настоящее время определяется по первому уровню разводки ДОЗУ $L_{\min} = \text{DRAM } 1/2 \text{ pitch} = \text{DRAM half pitch}$ [1].

Естественно, что минимальный размер элементов в регулярных структурах с зазорами, большими самих элементов, или изолированных элементов, расстояние между которыми в 10 и более раз больше их характерных размеров, может быть значительно (в 1,3—1,8 раза) меньше [1, 2]. К таким элементам относятся длины затворов комплементарных МОП-транзисторов в высокосовершенных ДОЗУ и МП.

В 1999 г. физическая длина затворов МОП-транзисторов в высокосовершенных МП и ДОЗУ стала меньше 100 нм [2], а в 2004 г. L_{\min} стала равное 90 нм (см. табл. 1). Переход микроэлектроники в субнанометровую область размеров вызвал не только технологические проблемы, связанные с повышением разрешения литографии и метрологии, улучшением контроля процессов и введением новых операций, материалов и структур в маршруты изготовления ИМС, но и привел к возникновению терминологической путаницы при использовании названий нанотехнология (НТ) и наноэлектроника (НЭ).

Наиболее точное и полное определение НТ, цитируемое во многих статьях и книгах, дает группа "Национальная нанотехнологическая инициатива" США (*National Nanotechnology Initiative*): "НТ — это научно-исследовательские и технологические разработки на атомарном, молекулярном или макромолекулярном уровнях с субнанометровой шкалой по одной или более координатам для обеспечения фундаментального понимания явлений и свойств материалов при таких размерах и для изготовления и использования структур, приборов и систем, которые имеют новые свойства и функции из-за их малых размеров" [4].

Согласно этому определению, современная КМОП-технология с полным основанием может быть названа НТ, а ее изделия — ИМС с субнанометровыми размерами элементов — можно считать базой НЭ. Действительно, КМОП-технология перешла границу 100 нм для размеров элементов в горизонтальной плоскости (длины и/или ширины) в массовом производстве изделий, давно использует слои с толщиной в диапазоне 1—100 нм (см. табл. 1) и с начала своего развития базируется на процессах осаждения, травления, легирования и модификации материалов, протекающих на атомарном, молекулярном и макромолекулярном уровнях.

Таким образом, с полным основанием можно утверждать, что в XXI веке микроэлектроника превратилась в наноэлектронику.

В технологии микро- и наноэлектроники для формирования микро- и наноструктур используется стратегический подход "сверху вниз" (top-down), т. е. осуществляется локальное удаление ненужных областей функциональных слоев заготовки путем их травления. При таком подходе точность воспроизведения размеров элементов

структур (разрешение, локальность травления) в горизонтальной плоскости обеспечивается с помощью резистивных масок, сформированных в процессах литографии с использованием радиационного воздействия (см. рисунок).

Таким образом, реализация уровня технологии ИМС с помощью процессов и оборудования радиационной литографии начинается с получения требуемых топологических норм (минимальных размеров элементов) в радиационно-чувствительных полимерных маскирующих слоях (в резистивных масках), нанесенных на функциональные слои пластины (подложки), путем их радиационного облучения (экспонирование) через шаблоны или маски, в которых создан требуемый топологический рисунок. При производстве ИМС должна обеспечиваться точность совмещения топологии функциональных слоев на пластинах не хуже 30—40 % от значения минимального размера элемента топологии.

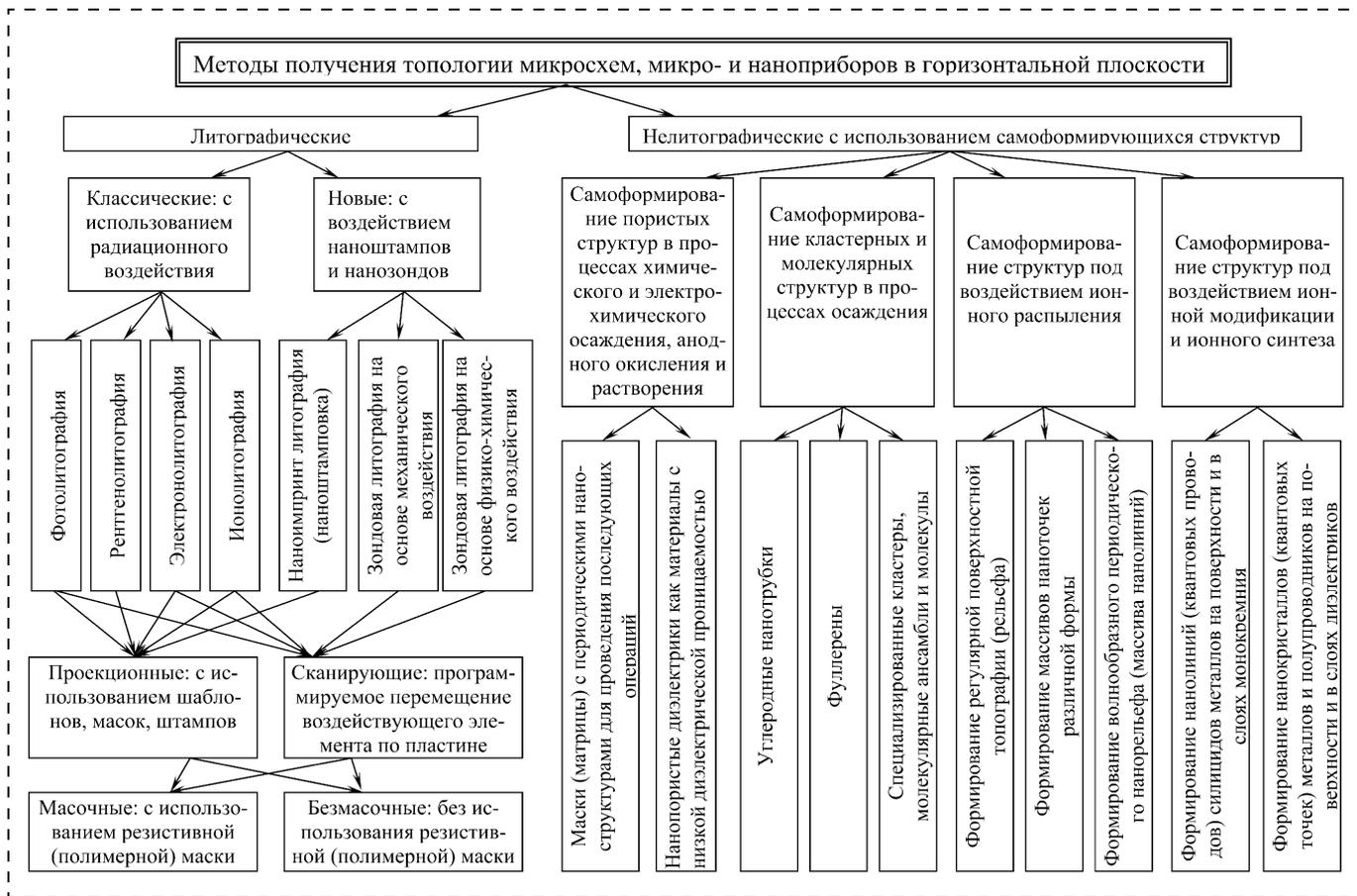
В качестве радиационного воздействия могут быть использованы фотоны различных энергий, рентгеновские лучи и потоки электронов и ионов. В зависимости от вида радиационного воздействия литография и ее основные элементы, шаблоны или маски, называются соответственно фото-, рентгено-, электроно- и ионолитографией, шаблонами и масками (см. рисунок).

В 2000 г. мировой консорциум производителей микросхем *International SEMATECH Inc.* принял решение, что индустрии необходимо два метода литографии: один высокопроизводительный для массового производства кристаллов ДОЗУ и МП, а другой, менее производительный, для малых объемов заказных и специализированных ИМС [18].

Заводы с массовым производством ИМС для обеспечения требуемой рентабельности требуют от процессов литографии обеспечения максимальной производительности 60—120 пластин в час, тогда как минифабрики обычно работают со средней производительностью процессов в 20—25 пластин в час.

Такие значения производительности называются промышленной производительностью. Для обеспечения промышленной производительности литография обязательно должна использовать шаблоны или маски для проекционного (параллельного) экспонирования резистивных слоев.

Лучевые (последовательные) литографии, при которых резистивные слои экспонируются путем программируемого последовательного перемещения (сканирования) по их поверхности сфокусированных пучков (лучей) света, рентгеновского излучения, электронов и ионов, имеют очень низкую производительность (от десятков минут до нескольких часов на одну пластину) даже при одновременном использовании десятков и сотен пучков. Лучевые литографии применяются для



Классификация методов получения топологии микросхем, микро- и наноприборов

изготовления комплектов шаблонов, масок и опытных образцов приборов и микросхем [2, 19].

Безмасочные проекционные и лучевые радиационные литографические процессы, реализуемые в лабораторных условиях, не получили промышленного внедрения из-за низкой производительности, повреждения поверхностных функциональных слоев и плохой контролируемости бокового профиля осаждаемых и травимых элементов [19].

В последние годы появились новые лабораторные нелитографические (на основе эффектов самоформирования) и литографические (с использованием воздействия наностампов и нанозондов) методы изготовления наноструктур, наноприборов и наносистем (см. рисунок) также претендующие на название "нанотехнология" [20—23].

Однако возникновение этих методов обусловлено, в первую очередь, развитием и исследованиями наноразмерного (примерно 1—100 нм) уровня структуры материи: его физики, химии и биологии. Поэтому все термины, связанные с созданием и изучением этого уровня, автоматически получили приставку "нано" например: нанопотоника, нанокристаллография, нанохимия, нанобиология, наноэлектроника, нанотехнология, нанокристалл, нанопоро-

шок, нанокомпозит, нанокерамика, нанопроводник, наноэлемент.

Если на макроуровне структуры материи действуют хорошо разработанные континуальные теории сплошных сред, а атомный уровень подчиняется законам квантовой механики, то находящийся между ними наноразмерный (низкоразмерный) уровень структуры материи очень слабо исследован, хотя на этом уровне протекают важнейшие для жизни биохимические процессы [22].

В нелитографических методах для создания наноразмерного топологического рисунка предпринимаются попытки использовать стратегический подход "снизу вверх" (*bottom-up*), т. е. осуществить управляемую безотходную самосборку (*self-assembly*) или самоорганизацию элементов структуры, прибора или системы из атомов, молекул или кластеров. При этом самопроизвольная организация атомов и малых молекул в большие, строго определенные и стабильные кластеры, молекулярные комплексы или агрегаты может происходить как в газовой фазе с последующим осаждением на подложку, так и при осаждении атомов или молекул на подложку с последующим самоупорядочением в полезные для разных применений наноструктуры.

В отличие от традиционного органического синтеза, включающего разрушение и перестройку

сильных ковалентных связей, разнообразные процессы самосборки используют слабые связи между частицами (водородные или силы Ван-дер-Ваальса), которые позволяют реакциям идти под термодинамическим контролем с постоянным исправлением ошибок [20].

В настоящее время нелитографические методы создания нанотопологии можно разделить на четыре большие группы [20—22] (см. рисунок):

- самоформирование периодических нанопористых структур в процессах химического и электрохимического осаждения, анодного окисления и растворения, которые используются либо в виде матриц для осаждения и выращивания новых функциональных слоев, либо в виде масок для травления, легирования и модификации функциональных слоев, либо в виде диэлектриков с низкой диэлектрической проницаемостью (*low-k dielectrics*);
- самоформирование массивов кластерных и молекулярных структур типа фуллеренов, углеродных нанотрубок, нанокристаллов, монослоев, молекулярных ансамблей и отдельных органических молекул в процессах химического осаждения из газовой и жидкой фазы, плазмохимического и ионо-кластерного осаждения, молекулярно-лучевой и жидкофазной эпитаксии, плазменной и радиационной обработки полимеров;
- самоформирование регулярного поверхностного рельефа и периодических массивов нанообластей в виде наноточек и нанополос различной формы в процессах ионного распыления;
- самоформирование массивов нанокристаллов (наноточек) и нанополос (нанопроводов) на поверхности и в слоях материалов под воздействием ионной модификации, ионного легирования и ионного синтеза.

Появление нелитографических методов формирования упорядоченных наноструктур, основанных на физико-химических процессах самоорганизации (самоформирования), обусловлено их более высокими технологичностью и разрешающей способностью, а также значительно меньшими трудоемкостью и стоимостью по сравнению с классическими литографическими методами. Более того, существуют перспективные наноструктуры, например углеродные нанотрубки (*carbon nanotube* — *CNT*), которые не могут быть созданы литографическими методами, а являются прерогативой метода самоформирования.

Однако все нелитографические методы имеют существенный недостаток, связанный с недостаточной контролируемостью и воспроизводимостью процессов самоформирования по размерам, степени упорядоченности или месту расположения наноструктур на пластине (подложке) [20—22]. Необходимо провести большой комплекс научно-

исследовательских работ для реализации возможности интеграции нелитографических методов в современную технологию микро- и нанoeлектроники.

Поэтому в настоящее время все нелитографические методы формирования наноструктур имеют исключительно экспериментальный (лабораторный) характер применительно к микро- и нанoeлектронике и не пригодны для промышленного использования в производстве ИМС и наноприборов.

Промышленного использования нелитографических методов надо ожидать, прежде всего, в области получения новых материалов и сред на основе наночастиц, перспективных для изготовления приборов и устройств функциональной электроники по классической технологии с использованием литографических методов.

Таким образом, литографические методы получения нанотопологии являются стратегическим путем развития технологии микро- и нанoeлектроники, а также производства ИМС и наноприборов.

Появившиеся новые литографические методы с воздействием на поверхность обрабатываемого слоя нанозондов сканирующего туннельного и атомно-силового микроскопов, а также различного типа наностампов, получили соответственно названия зондовой литографии (ЗЛ) и наноимпринт литографии (НИЛ) (см. рисунок).

Исходя из способа реализации зондовая литография может быть только сканирующей (СЗЛ — сканирующая ЗЛ), поэтому, как и все последовательные литографии, имеет очень низкую производительность. Даже создание многозондовых (1024 зонда) сканирующих матриц не обеспечивает СЗЛ производительности, необходимой для промышленного производства ИМС и наноприборов [20, 23].

В настоящее время СЗЛ может осуществляться в следующих средах:

- сверхвысоком вакууме (давление меньше 10^{-9} мм рт. ст.);
- в химически активных газовых средах при пониженном давлении;
- в газовых средах при атмосферном давлении;
- в жидкостных средах при атмосферном давлении;
- в газовых и жидкостных средах при повышенных (больше атмосферного) давлениях.

По виду воздействия на обрабатываемый слой зондовая литография подразделяется на СЗЛ с механическим воздействием нанозонда и СЗЛ с физико-химическим воздействием нанозонда (см. рисунок), к которому относятся тепловое и световое воздействие, воздействие электрического и магнитного полей, воздействие электронного и ионного токов [20—23].

СЗЛ с механическим воздействием нанозонда при атмосферном давлении обычно используется

для создания нанотопологии в маскирующем покрытии (маске), а в условиях сверхвысокого вакуума и низких температур (несколько градусов Кельвина) подложки, может проводить манипулирование с отдельными атомами и молекулами.

СЗЛ с физико-химическим воздействием нанозонда может реализовываться как масочный, так и безмасочный варианты создания нанотопологии. Масочная литография осуществляется при облучении (экспонировании) полимерного слоя (маски) потоком электронов или света с нанозонда, с последующим проявлением топологического рисунка в маске. Однако более перспективна безмасочная СЗЛ с физико-химическим воздействием нанозонда, которая может быть реализована в следующих вариантах [20—24]:

- локальное травление функционального слоя в области воздействия электронного или ионного тока нанозонда, приводящего к диссоциации и ионизации молекул химически активного газа;
- локальное осаждение функционального слоя в области воздействия электронного или ионного тока нанозонда, приводящего к диссоциации и ионизации молекул химически активного газа;
- локальное осаждение атомов нанозонда на поверхность подложки под воздействием сильного электрического поля;
- локальное газовое или электрохимическое окисление поверхности функционального слоя под воздействием тока нанозонда и частиц окружающей среды;
- локальная модификация функционального слоя под воздействием тепла, светового излучения или магнитного поля нанозонда;
- локальное закрепление органических молекул, образующих монослой на поверхности подложки (пластины), на обработанных с помощью электрического напряжения нанозонда областях (запись или рисование органическими молекулами наноразмерного топологического рисунка).

Таким образом, сканирующий туннельный и атомно-силовой микроскопы (СТМ и АСМ) позволяют не только проводить операции нанолитографии, но и при обеспечении соответствующей окружающей среды дают возможность реализовать комплекс механических и физико-химических обработок для создания любых наноструктур с одновременной визуализацией и контролем этих структур.

Следует отметить, что с помощью атомно-силового микроскопа удается наблюдать работу (процессы переноса зарядов и распределения потенциалов) и качество функциональных слоев в различных типах нанотранзисторов и других наноприборов, что крайне важно для понимания особенностей и закономерностей их работы, а также выявления слабых мест в их конструкциях.

Интеграция в единую кластерную систему "NanoFab" модуля универсального сканирующего зондового микроскопа, сочетающего возможности СТМ и АСМ, с модулями молекулярно-лучевой эпитаксии, химического осаждения из газовой фазы и плазмохимического травления, а также модулями электронной и ионной микроскопии, выполненная российской компанией НТ-МДТ, является важнейшим и необходимым шагом для развития отечественных научно-исследовательских и технологических работ в области создания наноматериалов, наноструктур, наноприборов и наносистем [3].

Выводы

- ♦ Без гарантий государства и сотрудничества с иностранными фирмами, имеющими свои ниши в мировом рынке ИМС, развитие микроэлектроники в России следует проводить с помощью создания минифабрик под конкретные целевые задачи.
- ♦ В период с 1999 по 2004 годы КМОП-технология, в качестве основной технологии производства ИМС, перешла рубеж в 100 нм для передовых изделий и стала нанотехнологией, соответственно превратив микроэлектронику в наноэлектронику.
- ♦ Исследования физических, химических и биологических свойств наноразмерного (1—100 нм) уровня материи, обладающего уникальными особенностями из-за большого влияния поверхностной энергии, имеют фундаментальное значение и могут оказать революционное воздействие на все виды человеческой деятельности, в том числе и на микроэлектронику.
- ♦ В настоящее время стратегическим путем развития промышленной технологии микро- и наноэлектроники являются литографические методы создания топологии структур.

Список литературы

1. **Киреев В.** Технология и оборудование для производства интегральных микросхем. Состояние и тенденции развития // Электроника. Наука. Технология. Бизнес. 2004. № 7. С. 72—77.
2. **The International Technology Roadmap for Semiconductors**, Semiconductor Industry Association, San Jose, CA. 2005.
3. **Киреев В., Столяров А.** Технологии микроэлектроники. Химическое осаждение из газовой фазы. М.: Техносфера. 2006. 192 с.
4. **Горнев Е.** Как нам обустроить свой микроэлектронный мир? // Электроника. Наука. Технология. Бизнес. 2004. № 7. С. 22—25.
5. **Алферов Ж.** Полупроводниковая электроника в России. Состояние и перспективы развития // Электроника. Наука. Технология. Бизнес. 2004. № 5. С. 88—92.
6. **Механик А.** Как нам перезагрузить матрицу // Эксперт. 2006. № 31. С. 52—58.

7. **Борисов Ю.** Обеспечения качества — стратегия развития радиоэлектронного комплекса // Электроника. Наука. Технология. Бизнес. 2004. № 7. С. 4—10.

8. **Handbook of Semiconductor Manufacturing Technology** / Ed. by Y. Nishi and R. Doering. N. Y.: Marcell Dekker. Inc. 2000. 1157 p.

9. **LoPiccolo P.** A node too far? // Solid State Technology. August 2005. P. 14.

10. **World News.** Asiafocus // Solid State Technology. February 2006. P. 18.

11. **Ristelhueber R.** New fabs don't have to cost \$1 billion // Electronic Business Buyer. December 1993. P. 63—65.

12. **0,35-мкм КМОП-процесс в России** — в 2004 году. Рассказывают академики РАН Е. П. Велихов, К. А. Валиев и В. Б. Бетелин // Электроника. Наука. Технология. Бизнес. 2004. № 3. С. 5—9.

13. **Бетелин В.** Опирайтесь на крупные проекты // Эксперт. 2006. № 31. С. 57.

14. **Moore G. E.** Cramming more components onto integrated circuits // Electronics. 1965. Vol. 38. No. 8. P. 114—117.

15. **Moore G. E.** Progress in digital integrated circuits // IEDM Technical Digest. 1975. P. 11—13.

16. **Mack C. A.** Using learning curve theory to redefine Moore's Law // Solid State Technology. July 2003. P. 51—58.

17. **Singer P.** Nanotechnology: embrace the future // Semiconductor International. March 2002. P. 17.

18. **Silverman P. J.** The Intel lithography roadmap // Intel Technology Journal. 2002. V. 6. No 2. P. 55—61.

19. **Microlithography: Science and Technology** / Ed. by J. R. Sheats and B. W. Smith. N. Y.: Marcell Dekker Inc. 1998. 780 p.

20. **Пул Ч., Оуэнс Ф.** Нанотехнологии. М.: Техносфера, 2004. 328 с.

21. **Нанотехнологии в электронике.** / Под ред. Ю. А. Чаплыгина. М.: Техносфера, 2005. 448 с.

22. **Нано- и микросистемная техника.** От исследований к разработкам / Сб. статей под ред. П. П. Мальцева / М.: Техносфера, 2005. 592 с.

23. **Неволин В.** Зондовые нанотехнологии в электронике. М.: Техносфера, 2005. 152 с.

24. **Nanotechnology news.** "Electro Pen" — Solid State Technology, October 2005. P. 18.

МАТЕРИАЛОВЕДЧЕСКИЕ И ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ НМСТ

УДК 621.3.049.77

И. А. Обухов, канд. физ.-мат. наук,
"Интерфейс-МФГ", г. Москва
E-mail: obukhov@interface-mfg.ru

САМООХЛАЖДЕНИЕ ЭМИТТЕРНОГО КОНТАКТА КВАНТОВОГО ПРОВОДА

Рассчитана температура эмиттерного контакта квантового провода как функция приложенного между эмиттером и коллектором напряжения. Показано, что при комнатной температуре окружающей среды самоохладение эмиттера может достигать десятков градусов. Эффект может быть использован в охлаждающих устройствах, управляемых напряжением.

Введение

Уже несколько лет в периодической научной печати обсуждается возможность создания твердотельных охлаждающих устройств, управляемых приложенным напряжением (см. работы [1—3] и цитируемую в них литературу). В основу функционирования такого холодильника может быть положено явление инжекции или, иначе, испарительной эмиссии электронов из эмиттерного контакта (ЭК) в проводящий канал (ПК) квантового провода (рис. 1).

Как показано в работах [3—5], электрические

свойства квантовых проводов во многом определяются положением энергии Ферми (E_F) электронов в контактных областях по отношению к максимальному значению высоты потенциального барьера для электронов, создаваемого проводящим каналом. Если энергия Ферми электронов меньше, чем эта высота (рис. 2), то при протекании тока через прибор существенный вклад в него дают инжектированные из контактов электроны.

Физической основой инжекции электронов из контактных областей в ПК являются поглощение и излучение электронами энергии тепловых флуктуаций. При поглощении электроны могут переходить из состояний с энергией, меньшей высоты потенциального барьера, в состояния с энергией, большей этой высоты. С той же вероятностью происходят и обратные переходы с излучением

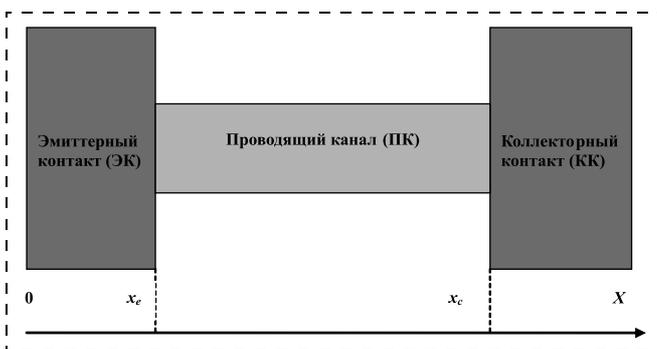


Рис. 1. Схематическое изображение квантового провода

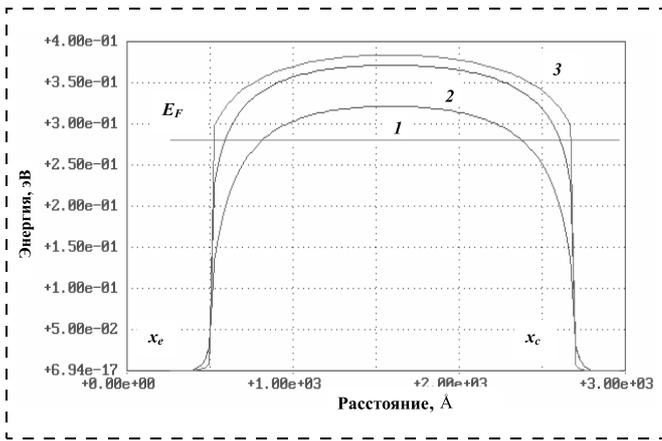


Рис. 2. Эффективные потенциальные рельефы для электронов в квантовом проводе в направлении Ox при напряжении между коллектором и эмиттером $V = 0$ и различных значениях поперечного сечения квантового провода L :

1 — $L = L_{dq}/2$; 2 — $L = L_{dq}/3$; 3 — $L = L_{dq}/4$. Здесь L_{dq} — длина размерного квантования для материала, из которого изготовлен квантовый провод

тепловой энергии. Если между эмиттером и коллектором приложено ненулевое смещение, то в приборе возникает электрический ток. Электроны, поглотившие тепловую энергию, увлекаются этим током из контакта с меньшим приложенным напряжением в проводящий канал. В ПК электроны не могут излучить тепловую энергию, поскольку в этой области отсутствуют состояния с энергией, меньшей высоты потенциального барьера. Излучение тепловой энергии и уменьшение энергии электронов происходит только в области противоположного контакта. Таким образом, при протекании тока баланс излучения и поглощения тепловой энергии в эмиттере и коллекторе квантового провода оказывается нарушенным. При положительном смещении коллектора по отношению к эмиттеру это должно приводить к охлаждению эмиттерного контакта и разогреву коллекторного. Для оценки возможностей технического применения описанного эффекта необходимо представлять, насколько значимым может быть предсказываемое охлаждение.

Температура эмиттерного контакта

Положим, что приложенное между коллектором и эмиттером напряжение $V \geq 0$.

В силу симметричности конструкции смена знака напряжения означает, что эмиттер и коллектор поменялись местами. Обозначим Δ разницу между максимальным значением эффективно-го потенциала для электронов в ПК и энергией Ферми E_F при нулевом смещении. Поскольку эффект инжекции и все связанные с ним явления существенны при $\Delta > 0$, будем считать это условие выполненным.

Заметим, что при сделанных допущениях электронный газ в контактных областях вырожден. В эмиттере его теплоемкость в расчете на одну частицу определяется соотношением [7]

$$C = k^2 T n_e^{-2/3} (\pi/3)^{2/3} (m/\hbar^2),$$

где k — постоянная Больцмана; T — температура эмиттера; n_e — концентрация электронов в ЭК; m — эффективная масса электрона в ЭК; \hbar — постоянная Планка. Для энергии электронов в ЭК справедливо выражение

$$E(T) = C T n_e V_e = \beta T^2 n_e^{1/3} V_e,$$

где V_e — объем ЭК и введено обозначение

$$\beta = k^2 (\pi/3)^{2/3} (m/\hbar^2).$$

Энергию, уносимую током из ЭК в ПК, можно оценить как

$$\Delta E = \Delta \int dx n_{in} \approx \Delta n_{ine} V_{ch}.$$

Здесь n_{in} — локальная концентрация инжектированных в ПК электронов; n_{ine} — средняя по ПК концентрация инжектированных электронов; V_{ch} — объем ПК. Интегрирование ведется по объему ПК.

Пусть в отсутствие тока температура прибора равна температуре окружающей среды T . При $V \neq 0$ изменение температуры эмиттерного контакта ΔT описывается уравнением баланса энергии

$$\Delta E = E(T) - E(T - \Delta T). \quad (1)$$

Считаем, что концентрация электронов в эмиттере велика и ее изменением при протекании тока можно пренебречь. Из уравнения (1) получим для ΔT уравнение

$$\Delta T^2 - 2T\Delta T + g = 0, \quad (2)$$

где $g = \Delta (n_e^{2/3} / \beta) (n_{ine} V_{ch} / n_e V_e)$.

Решение этого простого на вид уравнения представляет собой нетривиальную задачу, поскольку величина g является функцией от концентрации n_{ine} , которая, в свою очередь, зависит от температуры и приложенного напряжения. Уравнение (2) решалось численно. Для нахождения n_{ine} решалась задача о переносе заряда в КП, описанная в [4, 6].

На рис. 3 и 4 приведены рассчитанные зависимости температуры эмиттерного контакта

$$T_e = T - \Delta T$$

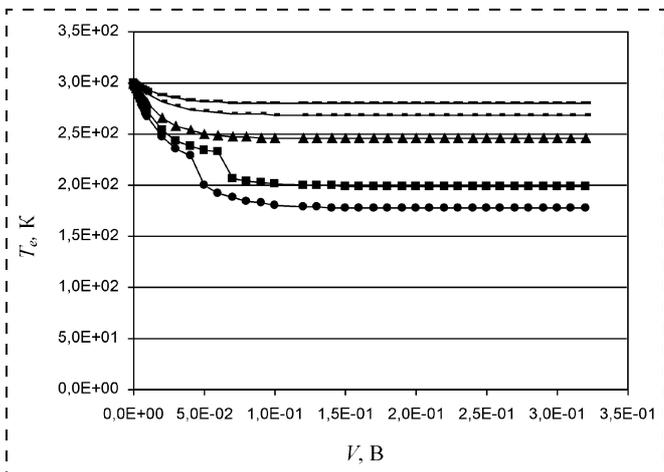


Рис. 3. Зависимость температуры эмиттерного контакта T_e от напряжения при $T = 300$ К, $V_e/V_{ch} = 100$ и $n_e = 5 \cdot 10^{22}$ см $^{-3}$, 10^{23} см $^{-3}$, $2,5 \cdot 10^{23}$ см $^{-3}$, $4 \cdot 10^{23}$ см $^{-3}$, $5 \cdot 10^{23}$ см $^{-3}$ (кривые сверху вниз)

от приложенного напряжения V при двух значениях $T = 300$ и 3 К, а также различных концентрациях электронов в эмиттере.

В расчетах полагалось, что длина ПК равна 10^{-4} см, а площадь сечения ПК варьировалась таким образом, чтобы при различных концентрациях электронов в контактах значение Δ было равно средней энергии тепловых флуктуаций kT . Во всех случаях площадь сечения ПК была порядка 10^{-12} см 2 , а V_{ch} — порядка 10^{-16} см 3 .

При $T = 300$ К объем эмиттерного контакта выбирался в 100 раз большим, чем объем проводящего канала, т. е. был порядка 10^{-14} см 3 . Если контакт реализован на металлической пленке с толщиной 10^{-6} см, то его планарные размеры могут быть микрометровыми (10^{-4} см). Для $T = 3$ К объем эмиттера считался в 1000 раз большим, чем объем ПК ($V_e = 10^{-13}$ см).

Заключение

Расчеты показывают, что при соответствующем выборе материалов и размеров может быть достигнуто значительное охлаждение эмиттерного контакта квантового провода. При комнатной температуре окружающей среды оно может составлять десятки градусов (до 120 К при выбранных параметрах). Это позволяет надеяться, что охлаждающие устройства на основе квантовых

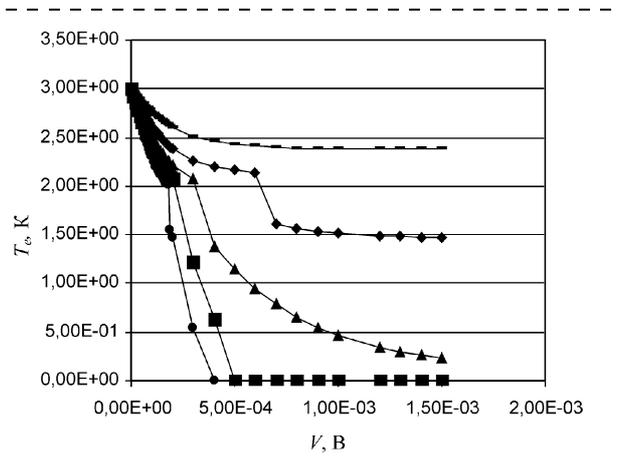


Рис. 4. Зависимость температуры эмиттерного контакта T_e от напряжения при $T = 3$ К, $V_e/V_{ch} = 1000$ и $n_e = 10^{22}$ см $^{-3}$, $2 \cdot 10^{22}$ см $^{-3}$, $3 \cdot 10^{22}$ см $^{-3}$, $4 \cdot 10^{22}$ см $^{-3}$, $5 \cdot 10^{22}$ см $^{-3}$ (кривые сверху вниз)

проводов могут найти широкое применение в технике. В частности, их можно использовать для охлаждения интегральных схем (процессоров). Существенно, что температуру охлаждения можно регулировать приложенным напряжением, т. е. строить электрические схемы, управляющие тепловым режимом.

Список литературы

1. Обухов И. А., Квяткевич И. И., Лавренчук А. А., Румянцев С. В. Статистические характеристики пересекающихся квантовых проводов // 14-я Междунар. Крымская конф. "СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии" (КрыМиКо'2004). Материалы конф. [Севастополь, 13–17 сент. 2004 г.]. Севастополь: Вебер. 2004. С. 507–511.
2. Jayasekera T., Mullen K., and Morrison M. A. Evaporative Cooling in Semiconductor Devices. <http://xxx.lanl.gov/pdf/cond-mat/0605073>, May, 2006.
3. Giazotto F., Heikkila T. T., Luukanen A., Savin A. M. and Pekola J. P. Thermal properties in mesoscopes: physics and applications from thermometry to refrigeration, <http://xxx.lanl.gov/abs/cond-mat/0508093>, May, 2006.
4. Обухов И. А. Моделирование переноса заряда в мезоскопических структурах. М.-К.-Мн.—Севастополь: Вебер, 2005. 226 с.
5. Обухов И. А. О температурной зависимости сопротивления металлических квантовых проводов // Нано- и микросистемная техника. 2006. № 6. С. 33–36.
6. Обухов И. А., Квяткевич И. И., Лавренчук А. А. Влияние контактных областей на электрические характеристики квантового провода // Матер. 16-й Междунар. Крымской микроволновой конференции, Севастополь, 2006. С. 650–654.
7. Ландау Л. Д., Лифшиц Е. М. Статистическая физика. Ч. I. М.: Наука, 1976. 584 с.

П. В. Шерстнев, Е. П. Шешин, д-р физ.-мат. наук, А. А. Чуприк,
Московский физико-технический институт
(государственный университет)

ИССЛЕДОВАНИЕ РАБОТЫ ВЫХОДА КАНТИЛЕВЕРА ПО РЕЗУЛЬТАТАМ АТОМНО-СИЛОВОЙ МИКРОСКОПИИ БИНАРНОЙ КОМПОЗИЦИИ Cu—Cr

Представлен краткий обзор методов измерения результатов локальной работы выхода в атомно-силовой микроскопии. Рассмотрена возможность осуществления классического метода Кельвина в силовой микроскопии. Измерено распределение работы выхода образца Cu—Cr на микроскопе Solver P-47 фирмы NT-MDT. Полученные результаты совпадают с табличными значениями для данных материалов. Определена работа выхода кантилевера.

Введение

Физика поверхностных явлений получила широкое развитие с появлением атомно-силовых микроскопов (АСМ). Наряду с возможностью получения топографии поверхности стало возможно определить основные поверхностные характеристики: локальное магнитное поле, локальную емкость, силы адгезии, капиллярные силы, вязкоупругие силы, поверхностный потенциал и многие другие [1, 2].

Как известно, одна из основных характеристик, определяющая возможность испускания электрона с поверхности твердого тела является работа выхода. Знание локального распределения работы выхода по поверхности различных материалов представляет интерес на стадиях разработки эмиттеров для вакуумных приборов. В частности, зная распределение работы выхода электронов по поверхности автоэмиссионных катодов, можно судить об их эмиссионной способности. В АСМ исследования поверхностного потенциала осуществляются наряду с измерением топографии, поэтому с помощью таких исследований можно локализовать отдельные эмиссионные центры.

Обычно в АСМ для измерения поверхностного потенциала используется так называемая Кельвин-мода [3]. Для определения абсолютного значения рабо-

ты выхода исследуемой поверхности необходимо провести калибровку прибора (определить работу выхода зонда). В работе предлагается отработать методику измерения распределения работы выхода на бинарной композиции медь—хром.

Бинарные композиции [4] представляют интерес для атомно-силовой микроскопии, так как в таких композициях не происходит взаимной диффузии одного вещества в другое. Соответственно, можно измерить распределение работы выхода двух различных материалов в одном цикле и более точно определить работу выхода зонда. Более того, кроме Кельвин-моды, в АСМ можно реализовать классический метод Кельвина [5]. В данной работе рассматривается возможность осуществления этого метода на базе микроскопа Solver P47.

Кельвин-мода и классический метод Кельвина

Кельвин-мода впервые была предложена в 1991 г. сотрудниками фирмы IBM (М. Нонненмахер и др.) [3]. Данная методика реализуется в бесконтактном режиме и состоит в регистрации электрически индуцированного возбуждения колебаний кантилевера (зонда) под действием силы, пропорциональной изменению разности потенциалов между кантилевером и образцом. В данном режиме кантилевер

находится на некотором расстоянии ΔZ над поверхностью образца. Между кантилевером и образцом прикладывается постоянное напряжение U_0 и переменное напряжение $U_1 \sin \omega t$. С помощью системы регистрации отклонений кантилевера и синхронного детектора регистрируется электрический сигнал, пропорциональный выражению

$$F = [(U_0 - \phi(x, y)) \times U_1 \sin(\omega t)] \frac{\partial C}{\partial Z}, \quad (1)$$

где $\phi(x, y)$ — значение поверхностного потенциала в точке измерения; $\partial C / \partial Z$ — производная емкости в зазоре кантилевер — поверхность. В соответствии с выражением (1) величина $F = 0$, если $U_0 = \phi(x, y)$, независимо от значения возбуждающего потенциала U_1 и $\partial C / \partial Z \gg 0$. Таким образом, подбирая к каждой точке сканируемой поверхности такое напряжение U_0 , при котором значение сигнала (1) равнялось нулю, получаем карту распределения поверхностного потенциала $\phi(x, y)$. Данная идея осуществляется с помощью системы обратной связи [1, 2]. В настоящее время Кельвин-мода широко используется в АСМ для исследования материалов, имеющих области с различными поверхностными потенциалами, для регистрации распределения зарядов на элементах поверхности, измерения и анализа неоднородно заряженных областей.

Рассмотрим классический метод измерения работы выхода — метод Кельвина [5] — и условия применимости его в АСМ. Если две пластины из разного материала, образующие конденсатор, соединить электрически, то между ними появится контактная разность потенциалов (КРП) U_k . Если периодически изменять расстояние $d = d_0(1 + a \cos \omega t)$ между пластинами, в цепи будет протекать переменный ток I , амплитуда которого пропорциональна КРП. Ток I в модели плоского конденсатора определяется формулой

$$I = U_k C_0 a \omega \sin \omega t, \quad (2)$$

где $C_0 = S/d_0$, $a \ll 1$. Соответственно, зная работу выхода материала одной пластины, можно определить работу выхода другой. Данный метод может быть реализован в АСМ в бесконтактном режиме. Одна из пластин является исследуемой поверхностью, а другая — кантилевером. Зонд находится на расстоянии d_0 над поверхностью образца и колеблется с амплитудой $a \ll d_0$. Таким образом, для исследования КРП необходимо в процессе сканирования регистрировать амплитуду емкостного тока (2), зависящую от КРП. Исходя из примерных значений радиуса закругления кантилевера $r = 10$ нм и расстояния между образцом и кантилевером $d_0 = 100$ нм, амплитуда ожидаемого тока будет равна 10^{-11} А. Этот ток порядка уровня шумов в АСМ Solver P47, что свидетельствует о невозможности осуществления данной методики на этой модели микроскопа. Однако для кантилевера с радиусом закругления 100 нм амплитуда ожидаемого тока при том же d_0 будет равна 10^{-9} А. В этом случае значение тока (2) намного больше уровня шумов Solver P47 и ток является детектируемой величиной. К сожалению, увеличение радиуса закругления кантилевера приводит к снижению разрешающей способности микроскопа. Таким образом, данная методика может быть осуществлена со специальными кантилеверами и на образцах с рельефом, превышающим предложенный размер кантилеверов. Следует отметить, что классический метод Кельвина также не позволяет измерить абсолютное значение работы выхода образца, поэтому необходимо провести калибровку кантилевера на образцах с известной работой выхода.

Методика измерений

Исследование распределения поверхностного потенциала образца Cu—Cr осуществлялось

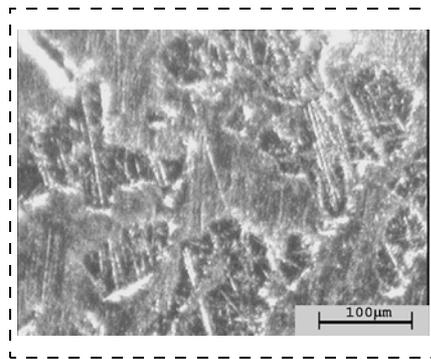


Рис. 1. Поверхность образца медь—хром

АСМ Solver P47, производимым фирмой NT-MDT. Данный микроскоп работает в условиях нормального атмосферного давления. Исследования осуществлялись кантилевером V-образной формы, длиной около 90 мкм. Острие кантилевера имеет радиус кривизны менее 10 нм, длину порядка 10 мкм и угол при вершине около 22° . Сканеры микроскопа изготовлены из пьезо-керамики. Максимальное поле сканирования микроскопа — 50×50 мкм. Максимальная измеряемая высота — 3 мкм. Измерения осуществлялись по двухпроходной методике: одновременно исследовалась топография поверхности и распределение поверхностного потенциала в Кельвин-моду [1,2].

Поверхностный потенциал ϕ , измеряемый АСМ, равен разности работ выхода кантилевера и образца $\phi = \phi_{\text{обр}} - \phi_{\text{конт}}$. Для определения $\phi_{\text{конт}}$ исследовался поверхностный потенциал бинарной композиции медь—хром (рис. 1). Данная композиция не образует сплава, а состоит из отдельных кристаллов Cu и Cr. Работы выхода для Cu и Cr хорошо известны. Поле сканирования микроскопа позволяет исследовать граничную область Cu и Cr, которую нетрудно обнаружить с помощью оптического микроскопа. Таким образом, поверхностный потенциал двух различных материалов может быть измерен при одних и тех же условиях. Причем разность работ выхода Cr и Cu должна равняться разности поверхност-

ного потенциала измеряемого АСМ в соответствующих областях. Соответственно, путем сравнения измеренной разности работ выхода материалов с табличным значением этой разности можно удостовериться в адекватной работе АСМ в Кельвин-моду и определить работу выхода кантилевера.

Результаты измерений

Результаты измерения распределения работы выхода и топографии поверхности представлены на рис. 2, 3. Измерения осуществлялись в граничных областях меди и хрома. Размер ступеньки по всей поверхности образца хром—медь был равен около 1 мкм. На рис. 2 хрому соответствует более выпуклый участок поверхности. Разность работ выхода меди и хрома в среднем по поверхности скана равна 0,16 эВ, табличное значение этой разности равно 0,18 эВ, что подтверждает адекватную работу АСМ в Кельвин-моду.

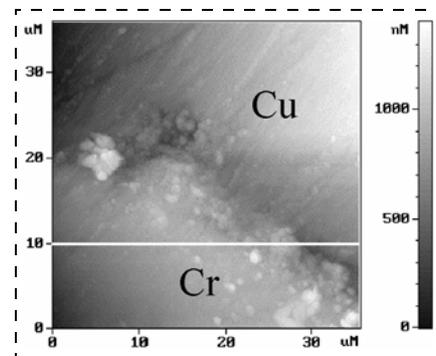


Рис. 2. 2D-топография поверхности на границе Cu—Cr

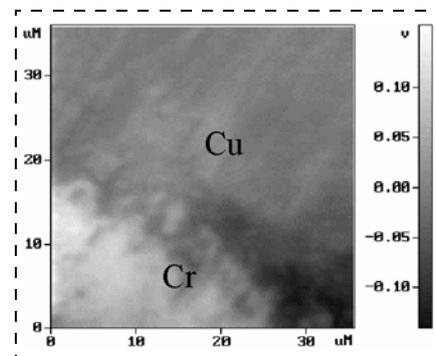


Рис. 3. 2D-распределение работы выхода на границе Cu—Cr

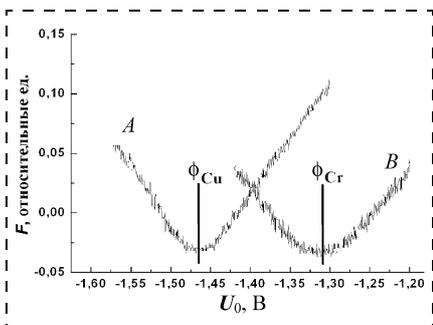


Рис. 4. Спектроскопия сигнала $F(U_0)$. Кривая A соответствует меди, а кривая B — хрому

Наряду с исследованиями распределения работы выхода по поверхности, можно измерить поверхностный потенциал в точке [1, 2]. А именно, измерить спектроскопию сигнала $F(U_0)$ в точке над поверхностью образца. В данном случае обратная связь отключена и этот режим используют для качественной проверки правильности измерений поверхностного потенциала.

Зависимость сигнала $F(U_0)$ для меди и хрома представлена на рис. 4. Значение поверхностного потенциала в этом случае соответствует значению U_0 , при котором функция $F(U_0)$ минимальна. По данным рис. 4 нахо-

дим $\phi_{Cu} \approx -1,47 \pm 0,05$ эВ, $\phi_{Cr} \approx -1,31 \pm 0,05$ эВ. Разность работы выхода Cu и Cr есть $\phi_{Cr} - \phi_{Cu} = \phi_{Cr} - \phi_{Cu} = 0,16 \pm 0,05$ эВ. Данная разность совпадает с результатом, полученным при сканировании поверхности границы Cu—Cr. По данным из справочника $(\phi_{Cr} - \phi_{Cu})_{табл} = 0,18$ эВ, тогда работа выхода кантилевера

$$\begin{aligned} \phi_{кантил} &= ((\phi_{Cr} + \phi_{Cu})_{табл} - \\ &\quad - (\phi_{Cr} + \phi_{Cu})_{измер})/2 = \\ &= 5,88 \pm 0,05 \text{ эВ.} \end{aligned} \quad (3)$$

Таким образом, для определения работы выхода кантилевера достаточно выполнить спектроскопию сигнала $F(U_0)$.

Заключение

В данной работе были рассмотрены два способа измерения работы выхода с помощью АСМ. Предложено изготовление новых типов кантилеверов для осуществления классического метода Кельвина. Коротко рассмотрены замечательные свойства бинарного соединения Cu—Cr. В Кельвин-моду исследовано распределение поверхностного потенциала на границе Cu—Cr. Пока-

зано, что благодаря одновременному исследованию распределения поверхностного потенциала материалов с различными работами выхода можно проверить адекватность измеряемых АСМ данных в Кельвин-моду и определить работу выхода кантилевера. Полученные данные находятся в удовлетворительном согласии с табличными значениями работы выхода Cu и Cr. С высокой точностью определена работа выхода кантилевера.

Список литературы

1. Grutter P., Mamin H. J., Rugar D. In Scanning Tunneling Microscopy II // Edited by R. Wiesendanger and H.-J. Guntherodt. Berlin: Springer, 1992.
2. Бухараев А. А., Овчинников Д. В., Бухараева А. А. Диагностика поверхности с помощью сканирующей силовой микроскопии (обзор) // Заводская лаборатория. 1997. № 5.
3. Nonnenmacher M., O'Boyle M. P., Wickramasinghe H. K. Kelvin probe force microscopy // Appl. Phys. Lett. 1991. V. 58. 2921.
4. Кипарисов С. С., Либенсон Г. А. Порошковая металлургия. 3-е изд. М.: Металлургия, 1991. 432 с.
5. Царев Б. М. Контактная разность потенциалов и ее влияние на работу электровакуумных приборов. 2-е изд. М., 1955.

УДК 621.9.047.7

О. П. Гушин, Е. В. Данилкин, А. Ю. Падерин, ОАО "НИИМЭ и МИКРОН", г. Москва

МЕТОДЫ ФОРМИРОВАНИЯ КАНАВОК В ТЕХНОЛОГИИ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ЩЕЛЕВЫХ ДМОП-ТРАНЗИСТОРОВ

Оптимальным конструктивно-технологическим вариантом быстродействующих низковольтных транзисторов является щелевой ДМОП-транзистор, обладающий высокой плотностью элементов, низким сопротивлением в открытом состоянии, надежностью и высокой скоростью переключения. Обсуждаются основные проблемы технологии щелевых ДМОП-транзисторов и особенности плазменных процессов в реакторе высокоплотной плазмы при формировании канавок, применяемых в конструкции ДМОП-транзисторов.

В настоящее время ведутся интенсивные исследования в целях улучшения электрических па-

раметров изделий силовой микроэлектроники, уделяется большое внимание разработке, совершенствованию и освоению производства быстродействующих низковольтных транзисторов, в частности, силовых МОП-транзисторов, обладающих высоким входным сопротивлением, низким сопротивлением в открытом состоянии, надежностью и высокой скоростью переключения. Так, МОП-транзисторы используются в электронных схемах источников питания и дисководов, для которых требуется относительно низкое (<100 В) блокирующее напряжение и высокие скорости переключения (>100 Гц) [1].

Известно, что развитие силовых МОП-транзисторов начиналось с U-образных МОП-структур, а первые серийные широко применяемые электронные устройства силовой электроники были созданы на ДМОП-структурах. Канал ДМОП-транзистора (рис. 1, см. вторую сторону обложки) формируется на поверхности методом двойной диффузии [2], его длина определяется латераль-

ной диффузией областей P -базы и N^+ -истока. Сильно легированная P^+ -область подавляет действие паразитного $n-p-n$ -транзистора, характерного для МОП-структур. Ток от стока к истоку, индуцируемый смещением, приложенным к затвору, создает канал на поверхности области P -базы. На сопротивление между стоком и истоком в основном влияет степень легирования области полевого транзистора с $p-n$ -переходом (JFET-область), обогащенной области, областей дрейфа и канала. Кроме того, для низковольтных (< 100 В) устройств необходимо учитывать сопротивление омических контактов и влияние N^+ -подложки.

Анализ распределения сопротивления в областях ДМОП-структуры показывает, что вклад области канала является доминирующим вследствие его относительно большого сопротивления в открытом состоянии. Емкость Миллера в ДМОП-транзисторе может быть снижена за счет уменьшения расстояния между P -базовыми областями, но в этом случае увеличивается сопротивление сток—исток в открытом состоянии (R_{dson}). Ширина затвора должна быть рассчитана так, чтобы получить заданное сопротивление R_{dson} , так как при увеличении ширины затвора увеличивается размер кристалла, а при уменьшении — увеличивается сопротивление JFET-области, следовательно, и сопротивление R_{dson} .

Несколько лет назад в конструкции силовых ДМОП-транзисторов стали применять щелевые затворы, что позволило получить высокую плотность тока в канале и меньшее сопротивление растекания стока, приведшее к уменьшению сопротивления ДМОП-транзистора в открытом состоянии. В структуре ДМОП-транзистора со щелевым затвором (рис. 2, см. вторую сторону обложки), обычно называемой U -образной ДМОП структурой, канал сформирован на вертикальных боковых стенах протравленной в кремнии канавки.

Поскольку в этом случае ток сток—исток течет по вертикали, сопротивление JFET-области можно не учитывать. Сопротивление в открытом состоянии уменьшается не только исключением этого фактора, но также за счет меньшего размера ячейки, что, естественно, увеличивает плотность тока на единицу площади кристалла. Для щелевых ДМОП-транзисторов с напряжением сток—исток 60 В удельное сопротивление в открытом состоянии составляло $1 \text{ мОм} \cdot \text{см}^2$, а с напряжением сток—исток 30 В удельное сопротивление составляло $0,25 \text{ мОм} \cdot \text{см}^2$. Для сравнения, в планарном ДМОП-транзисторе (см. рис. 1 на второй стороне обложки) удельное сопротивление в открытом состоянии не снижается ниже $2 \text{ мОм} \cdot \text{см}^2$ для напряжения сток—исток 30 В.

К сожалению, производство щелевых ДМОП-транзисторов имеет проблему, связанную с высокими электрическими полями в углах канавки

и на боковых стенках в случае их шероховатостей (рис. 2). Эта проблема решается путем скругления углов, достижения большей гладкости стенок и ослабления электрического поля — P^+ -области [3, 4], так как напряжение пробоя в P^+ -области меньше напряжения пробоя в угле канавки.

Поэтому в технологии производства щелевых ДМОП-транзисторов к травлению канавок предъявляются высокие требования: строго вертикальные и гладкие стенки, U -образное дно с радиусом закругления $1/3$ от ширины канавки, высокая воспроизводимость глубины и профиля травления по площади пластины.

В производстве щелевых ДМОП-транзисторов технология травления канавок в кремнии используется также для формирования изоляции элементов транзистора с помощью узких канавок, заполненных диэлектриком (обычно SiO_2). Известно, что диэлектрическая изоляция имеет значительные преимущества перед изоляцией $p-n$ -переходом: меньше ток утечки, емкость элемента изоляции примерно в 6 раз меньше и не зависит от приложенного напряжения, улучшаются вольтамперные характеристики (меньше искажений) и повышаются рабочие частоты высокоскоростных схем [5].

Методы формирования канавок в кремнии

В настоящее время для формирования канавок в кремнии используются несколько методов:

- непрерывный процесс травления кремния на глубину до 10 мкм и два процесса глубинного травления кремния с высоким аспектным отношением (отношение глубины к ширине канавки > 10);
- процесс с переменной модуляцией газа (в литературе известен как Bosch-процесс или TMGM-процесс (у Applied Materials) [6]) и процесс, проводимый при низких температурах, известный как криопроецесс. Все эти методы осуществляются в реакторах высокоплотной плазмы (HDP), так как в них достигается необходимый баланс между ионами и радикалами. Наиболее широко используемая форма HDP-реакторов — реакторы индуктивно связанной плазмы (ICP).

Непрерывный процесс травления — это реактивно-ионное травление кремния во фтор- или хлорсодержащих газах. Радикалы фтора и хлора взаимодействуют с поверхностью кремния и удаляются в виде летучих соединений SiF_4 и SiCl_4 соответственно. Роль ионной бомбардировки состоит в том, что она нарушает поверхность кремния, и взаимодействие нарушенной поверхности с химически активными частицами ускоряется. В настоящее время для травления канавок (рис. 3) в кремнии в основном используют смеси газов $\text{SF}_6 + \text{O}_2$, $\text{HBr}/\text{Cl}_2/\text{He}-\text{O}_2$, $\text{SF}_6/\text{O}_2/\text{CHF}_3$ и $\text{SF}_6/\text{O}_2/\text{HBr}$ [7, 8]. Анизотропность травления

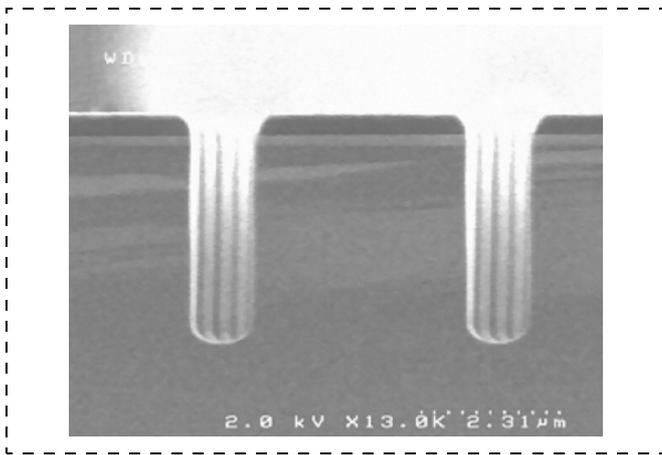


Рис. 3. Канавка в кремнии, полученная с помощью непрерывного процесса травления

осуществляется благодаря добавке HBr или CHF_3 . Радикалы Br или полимер C_xF_y осаждаются на боковых стенках и препятствуют боковому травлению. В случае использования смеси $\text{SF}_6 + \text{O}_2$ на боковых стенках образуется SiO_2 . Для непрерывного процесса характерны невысокие скорости травления кремния (до 3 мкм/мин) и относительно низкая селективность к материалу маски (до 7 к фоторезисту и до 50 к SiC_2). Достоинствами процесса являются гладкие стенки, чистое скругленное дно, дешевые реактивы и отсутствие продуктов полимеризации на стенках реактора.

В *Bosch-процессе* для травления кремния (рис. 4) используется плазма фтора, объединенная с плазмой фторуглерода для обеспечения пассивации боковых стенок и улучшения селективности относительно маски. Гексофторид серы (SF_6) является исходным газом, используемым для создания радикалов фтора при травлении кремния. Молекула SF_6 расщепляется в высокоплотной плазме с образованием свободных радикалов фтора. Пассивация боковых стенок канавки и защита маски осуществляется с использованием октофторциклобутана ($\text{c-C}_4\text{F}_8$). Циклический фторуглерод

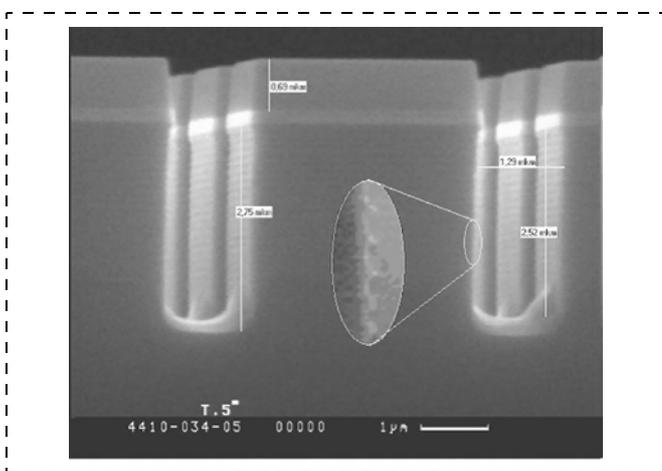


Рис. 4. Канавка в кремнии, полученная с помощью Bosch-процесса

диссоциирует в высокоплотной плазме с образованием CF_2 и более длинных радикальных цепей, которые осаждаются в виде фторуглеродных полимеров на поверхности травления. Полный цикл процесса повторяется несколько раз, чтобы обеспечить глубокий вертикальный профиль. Скорость травления кремния 20 мкм/мин, селективность относительно фоторезиста — до 75, относительно SiO_2 — до 200 [6, 9, 10].

В *криогенном процессе* для травления кремния используется SF_6 (для создания радикалов фтора) и O_2 . Для пассивации боковой стенки и защиты маски используется формирующийся блокирующий слой оксифторида кремния (SiO_xF_y), препятствующий боковому травлению. Взаимодействие радикалов фтора с этим слоем при криогенных температурах снижается. Ионная бомбардировка способствует постоянному удалению этого слоя, а поток радикалов фтора взаимодействует со свободной поверхностью кремния, благодаря этому скорость травления возрастает. Кремний удаляется в виде летучего соединения SiF_4 . В криогенном процессе, так же как и в *Bosch-процессе*, достигаются высокие скорости травления (до 20 мкм/мин), а селективность к материалу маски значительно выше (до 100 к фоторезисту и до 1000 к SiO_2) [9, 11].

Заключение

Из перечисленных способов травления канавок в кремнии наиболее полно удовлетворяют требованиям непрерывный процесс травления (рис. 3) и криогенный процесс, так как в обоих процессах из-за постоянной подачи газа создаются гладкие боковые поверхности и формируется скругленное дно. Правда, криогенный процесс имеет существенный недостаток — значительную температурную чувствительность, что требует более тщательной очистки обратной стороны пластины для обеспечения равномерной теплопроводности по всей поверхности, что делает его сложным и дорогостоящим, следовательно, мало пригодным для серийного производства ДМОП-транзисторов.

Криогенный процесс используется в изготовлении углублений с положительным профилем и при травлении больших открытых областей (например, формирование микроигл).

Bosch-процесс — высокоскоростной процесс травления, позволяющий достичь высокоаспектного отношения, удовлетворяет практически всем требованиям, таким как вертикальные стенки канавки, U-образное дно с радиусом закругления 1/3 от ширины канавки, высокая воспроизводимость глубины и профиля травления по площади пластины. Однако недостатком этого процесса является шероховатость стенок, возникающая в виде раковин после каждого шага травления (на рис. 4 хорошо видны раковины). Естественно, чем меньше размеры раковин, тем глаже стенка

канавки. Для уменьшения шероховатости стенок необходимо увеличивать частоту переключения газов плазмы при сохранении постоянным отношения составляющих элементов цикла (травление/пассивация). Но идеально гладкую боковую поверхность пока получить не удается.

Если в технологии ДМОП-транзисторов использовать Bosch-процесс, то при дальнейшем окислении поверхности канавки получается неровный слой оксида с множеством дефектов, в результате чего увеличивается длина канала L и уменьшается подвижность носителей заряда μ . На основании зависимости

$$R_{dson} \sim L/\mu,$$

сопротивление сток—исток увеличивается. Делая вывод, что Bosch-процесс не применим в технологии ДМОП-транзисторов.

Наиболее эффективно Bosch-процесс используется при изготовлении МЭМС-изделий широкой номенклатуры: от пишущих головок принтера до акселерометров. Так как для МЭМС-технологии важными факторами является скорость травления, селективность, возможность достижения высокого аспектного отношения, высокая однородность по пластине и дешевизна процесса.

Таким образом, на основании приведенных рассуждений можно заключить, что для формирования канавок в кремнии в технологии силовых ДМОП-транзисторов наиболее выгодным будет использование непрерывного процесса травления кремния.

Список литературы

1. **Baliga B.** The future of power semiconductor device technology // Proceedings of the IEEE. 2001. Vol. 89. Issue 6. P. 822—832.
2. **Baliga B., Girdhar D.** Paradigm Shift in Planar Power MOSFET technology (http://www.siliconsemi.com/PDFFiles/paradigm_shift.pdf).
3. **Barkhordarian V.** Power MOSFET Basics (<http://www.irf.com/technical-info/appnotes/an-1084.pdf>).
4. **McDonald T., Soldano M.** Power MOSFET Avalanche Design Guidelines (<http://www.irf.com/technical-info/appnotes/an-1005.pdf>).
5. **Stibila M. E., Thiel F.** The benefits of trench isolation in high-voltage, high-bandwidth semiconductors (<http://www.analog-zone.com/nett0614.pdf>).
6. **Nallan P., Kban A. H., Kumar A. and Podlesnik D.** Speeding high aspect ratio etch // European semiconductor. 2002. Vol. 24. № 8. P. 41—45.
7. **Плазменная технология в производстве СБИС /** Под ред. Н. Айнспрука и Д. Брауна. М.: Мир, 1987. 469 с.
8. **Armacost M., Hoh P. D., Wise R., Yan W., Brown J. J., Keller J. H., Kaplita G. A., Halle S. D., Muller K. P., Naeem M. D., Srinivasan S., Ng H. Y., Gutsche M., Gutmann A. and Spuler B.** Plasma-etching processes for ULSI semiconductor circuits // IBM Journal of Research and Development. 1999. Vol. 43.
9. **Wal M. J.** Comparison of Bosch and cryogenic processes for patterning high aspect ratio features in silicon // Oxford Instruments Plasma Technology, 2001 (<http://www.oxford-instruments.com.cn/product/oipt/PAPERS/SPIE3.PDF>).
10. **Гушин О. П., Данилкин Е. В., Мочалов А. И.** Травление кремния методом переменной модуляции газов SF_6 и C_4F_8 // Изв. вузов. Сер. "Электроника". 2006. № 4. С. 8—12.
11. **De Boer M. J., Gardeniers J. G. E., Jansen H. V., Smulders E., Gilde M. J., Roelofs G., Sasserath J. N. and Elwenspoek M.** Guidelines for etching silicon MEMS structures using fluorine high-density plasmas at cryogenic temperatures // Journal of microelectromechanical systems. 2002. Vol. 11. № 4. P. 385—401 (<http://www.oichina.cn/product/oipt/papers/Cryo-Guide.pdf>).

УДК 621.385.833

И. И. Бобринецкий, канд. техн. наук,
В. К. Неволин, д-р физ.-мат. наук, проф.,
М. М. Симунин,
МИЭТ, г. Москва (Зеленоград),
e-mail: vkn@miec.ru

ВЛИЯНИЕ СОРБЦИИ ПАРОВ СПИРТА НА ПРОВОДИМОСТЬ СТРУКТУР НА ОСНОВЕ УГЛЕРОДНЫХ НАНОТРУБОК

Для создания сверхчувствительных сенсоров разработаны структуры на основе пленок и одиночных молекул нанотрубок. Исследованы электрические характеристики структур в атмосфере паров этанола и 2-пропанола. Рассмотрены механизмы взаимодействия паров спиртов и углеродных нанотрубок.

Введение

Углеродные нанотрубки с момента их открытия [1] активно исследуются как перспективный

материал для применения в различных отраслях науки и техники. Благодаря идеальной геометрической форме и уникальной зонной структуре нанотрубки обладают набором особенностей, отличных от свойств массивных материалов, и становятся в один ряд с нанопорошками в классе наноматериалов. Несмотря на продолжительный период изучения нанотрубок, результаты которого изложены, например, в монографиях [2, 3], выявление механизмов влияния внешних условий на электрофизические характеристики нанотрубок в составе различных функциональных элементов является актуальным вопросом развития современной техники. Электронные свойства нанотрубок в логических схемах [4, 5], в сенсорных системах [6—8] представляют интерес при разработке элементов наноэлектроники и сенсорной техники.

В чувствительных элементах сенсоров можно использовать как отдельные углеродные нанотрубки, основываясь на свойствах их зонной структуры [1], так и нанотрубки в виде сеток и пленок [9].

При этом наблюдаются различные механизмы взаимодействия с детектируемым веществом и соответствующие изменения электрических свойств элементов на основе углеродных нанотрубок.

В данной статье исследуется влияние паров летучих органических соединений (спиртов) на проводимость структур на основе углеродных нанотрубок. Были разработаны тестовые структуры в виде транзисторов на основе углеродных нанотрубок полупроводникового типа, пленок многослойных (МСНТ) и однослойных нанотрубок (ОСНТ).

Экспериментальная установка

Установка для проведения эксперимента представляет собой герметичную камеру, в которой размещается структура с углеродными нанотрубками. В установке обеспечена возможность подведения системы внешних электрических контактов. В камеру дозированным распылением вводится пар спирта (в работе был использован 2-пропанол ОС.Ч 99,9999 % и этанол азеотропного состава). Схематическое изображение установки показано на рис. 1.

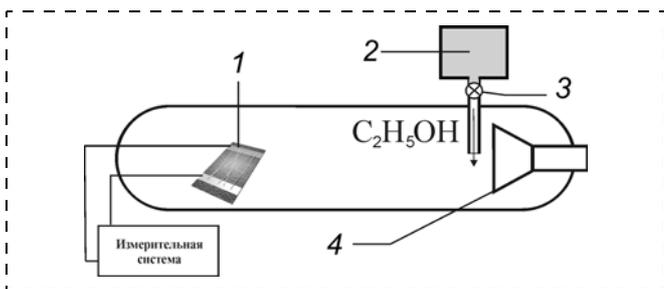


Рис. 1. Схема установки измерения чувствительности структур на основе углеродных нанотрубок к парам летучих органических соединений:

1 — структура с углеродными нанотрубками, подключенная к измерительной системе; 2 — органическое соединение (спирт); 3 — система дозирования; 4 — система распыления

Структуры на основе пленок углеродных нанотрубок в парах этанола и 2-пропанола

Пленки нанотрубок толщиной до 400 нм наносились на золотые электроды двумя способами:

- многократным осаждением углеродных нанотрубок из раствора в 2-пропанол;е;
- однократным нанесением сетки из взвеси в растворе нанотрубок.

В первом случае формировались сплошные сетки, большие по площади, однако, предположительно имеющие значительные включения аморфного углерода, частиц катализатора и других примесей, приходящих из раствора на поверхность с нанотрубками. Во втором случае размер пленки определяется объемом коагулированных нанотрубок в растворе. Пленки при этом не обладают однород-

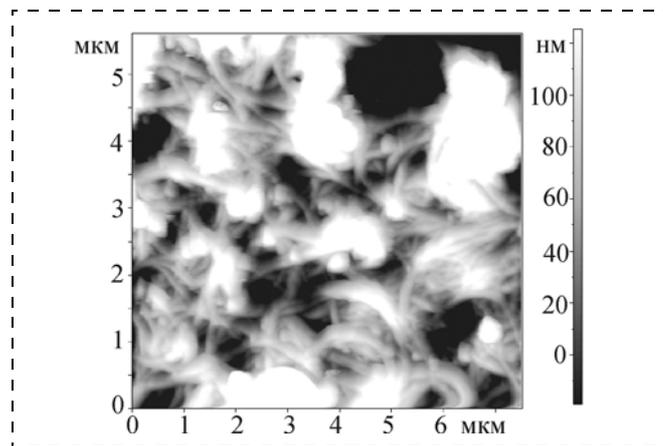


Рис. 2. АСМ-изображение поверхности пленки из углеродных нанотрубок

ностью распределения по толщине, однако менее подвержены загрязнению и не требуют проведения специальных литографических операций для формирования необходимого распределения сеток между электродами. На рис. 2 приведено АСМ-изображение поверхности пленки из углеродных ОСНТ, нанесенных на золотые электроды из раствора коагулированных нанотрубок. После нанесения пленок нанотрубок структуры для улучшения контакта с электродами отжигались при температуре 500 °С в вакууме 10^{-2} Торр (1,33 Па) в течение 30 мин.

Структуры с сетками углеродных нанотрубок помещались в камеру с контролируемой атмосферой. Изначально проводимость пленок составляла порядка $10^{-3}—10^{-2}$ Ом⁻¹. После стабилизации временных характеристик через ~20 минут проводилось введение 8 % паров этанола. Проводимость начинала уменьшаться, при этом в течение нескольких часов уменьшение продолжалось без выхода на насыщение (рис. 3, кривая 1).

После вскрытия камеры наблюдается рост проводимости со скоростью $14 \cdot 10^{-6}$ Ом⁻¹ · мин⁻¹, превышающей скорость уменьшения проводимости в парах спиртов до момента вскрытия. Образцы выдерживались при комнатной температуре и атмосферном давлении в течение 96 ч. За это время средняя скорость восстановления уменьшилась на три порядка и составила $11,5 \cdot 10^{-9}$ Ом⁻¹ · мин⁻¹. При этом проводимость стала равной 90 % от первоначального значения. Данное обстоятельство может свидетельствовать о преобладании механизма физической адсорбции в сенсоре. Остаточное насыщение обуславливается диффузией спиртов внутрь пленки и, как следствие, изменением ее характеристик. Для восстановления исходного значения проводимости необходимо проведение дополнительного отжига [10] структуры либо ее вакуумирование [11].

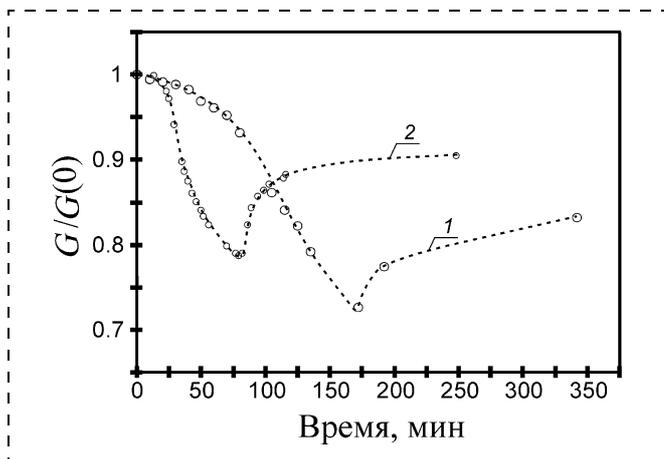


Рис. 3. Изменение проводимости пленок ОСНТ при введении этанола концентрацией 8 ‰ (кривая 1) и 2-пропанола концентрацией 15 ‰. Напряжение питания — 0,7 В. Потребляемая мощность 0,25 мВт

Исследовалось влияние паров других спиртов (2-пропанола) на проводимость структуры на основе пленки ОСНТ. В камеру вводилось 15 ‰ паров 2-пропанола. Проводимость, как и в случае с этанолом, уменьшалась (рис. 3, кривая 2). После вскрытия камеры наблюдается рост проводимости с первоначальной скоростью $3 \cdot 10^{-6} \text{ Ом}^{-1} \cdot \text{мин}^{-1}$. Однако далее скорость восстановления проводимости уменьшается. Сравнивая с результатами эксперимента по сорбции этанола, можно заметить, что благодаря меньшей температуре кипения 2-пропанола, чем этанола, испарение первого изначально более предпочтительно. Для восстановления исходного значения проводимости необходимо проведение дополнительного отжига структуры.

Толстые пленки МСНТ формировались аналогично ОСНТ-пленкам — нанесением коагулированной суспензии нанотрубок на поверхность золотых электродов. Для улучшения контакта пленки отжигались при температуре 500 °С в вакууме 10^{-2} Торр (1,33 Па) в течение 30 мин.

Структуры с сетками углеродных нанотрубок помещались в камеру с контролируемой атмосферой. Изначально проводимость пленок находилась в диапазоне $0,2 \cdot 10^{-2} - 10^{-2} \text{ Ом}^{-1}$. На рис. 4 показано изменение проводимости пленки при введении 8 ‰ паров этанола. Дополнительно были проведены исследования воспроизводимости параметров структур при проведении последовательных процедур вскрытия и введения паров спирта. На рис. 4 в моменты времени 70 и 120 мин камера была вскрыта. При этом проводимость структуры с пленкой нанотрубок увеличивается с той же скоростью, с которой до этого шло ее уменьшение. Данная зависимость может быть объяснена слабой физической связью внешних слоев пленок нанотрубок и молекул пара, преимущественно сорбирующихся на поверхности МСНТ пленки и не успевших до вскры-

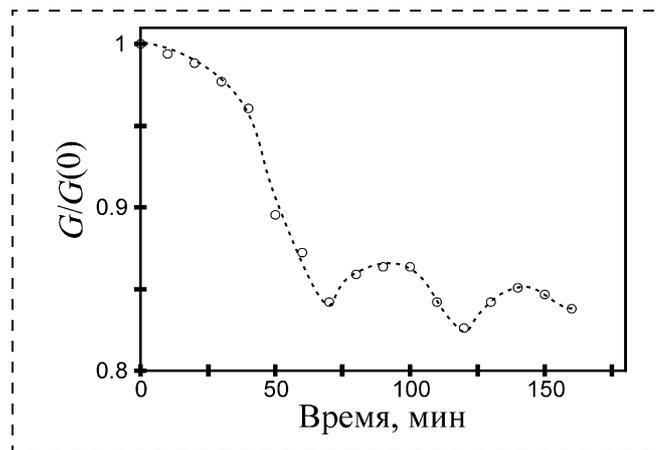


Рис. 4. Изменение проводимости пленок МСНТ при введении паров этанола концентрацией 8 ‰. Циклическое введение паров в моменты времени 90 и 140 мин концентрацией 12 ‰. Напряжение питания — 0,7 В. Потребляемая мощность 3 мВт

тия диффундировать в ее тело. После герметизации в моменты времени 90 и 140 мин и добавления по 12 ‰ паров этанола проводимость структуры начинает уменьшаться с той же скоростью, какая наблюдалась до вскрытия камеры.

Таким образом, если в начальный момент изменение проводимости структуры с пленкой нанотрубок определяется преимущественно сорбцией спиртов на поверхности пленки и зависит от поверхностной площади сенсора, то при насыщении поверхности парами дальнейшее изменение проводимости связано с диффузией паров в глубь пленки и определяется скоростью диффузии определенных молекул спирта в среде нанотрубок.

Качественно одинаковые зависимости отклика сенсоров на основе пленок многослойных и однослойных нанотрубок свидетельствует о преобладании диффузионно-сорбционного механизма изменения проводимости под действием паров спиртов. При этом преобладают физические механизмы изменения проводимости за счет внедрения молекул спирта в области контактов нанотрубка — нанотрубка и нанотрубка — электрод и, как следствие, увеличения расстояния между ними. В этом приближении большее время отклика пленки ОСНТ при введении этанола (см. рис. 3), чем время отклика пленки МСНТ, может быть объяснено более высоким коэффициентом диффузии молекул спирта в пленке, состоящей преимущественно из многослойных нанотрубок, имеющих больший диаметр и более низкую плотность в сетке.

Для восстановления проводимости структур на основе пленок ОСНТ и МСНТ было предложено использовать внешний источник нагрева при температуре 500 °С. Было обнаружено, что в процессе отжига скорость восстановления проводимости может возрастать в 25 раз, и значение в 90 % от первоначального достигается в течение 2 мин.

Особенности проводимости канала ОСНТ-транзистора в парах 2-пропанола

Углеродные нанотрубки, представляющие собой преимущественно пучки однослойных нанотрубок диаметром 1–10 нм, равномерно наносились на кремниевую подложку со сформированным на ней слоем Al_2O_3 толщиной 400 нм. Роль затвора выполняет сформированный под оксидом электрод (Сг) толщиной 30 нм. После нанесения нанотрубок на пластину наносился фоторезист и формировались Au/Сг контакты к нанотрубкам толщиной 100 нм. Для улучшения контакта проводился отжиг в вакууме 10^{-2} Торр (1,33 Па) при температуре 500 °С в течение 30 мин.

На рис. 5, а приведено АСМ-изображение участка структуры с пучком углеродных нанотрубок под золотыми электродами. На рис. 5, б представлено типичное семейство вольтамперных характеристик ОСНТ-транзистора для трех значений потенциала затвора: 0, +30, –30 В. Несимметричность характеристик обусловлена различием в барьерах Шоттки в областях стока и истока [12]. Двухполюсное сопротивление структуры на рис. 5 составляет 33 МОм, что свидетельствует о высо-

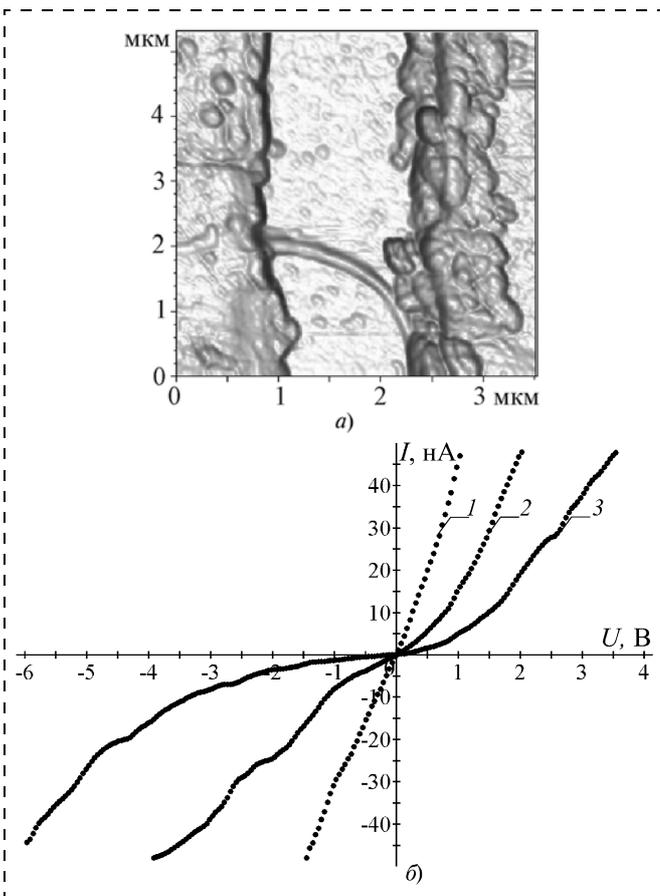


Рис. 5. АСМ-изображение углеродной нанотрубки, закрепленной под электродами (а) и ВАХ-структуры нанотрубки под электродами (б) для значений потенциала затвора:

1 – –30 В; 2 – 0 В; 3 – +30 В

ком контактном сопротивлении между нанотрубкой и контактными электродами.

После размещения структуры в камере с атмосферным давлением и введения 9 % 2-пропанола проводилось измерение статических электрических характеристик в течение 10 мин. В таблице приведены значения тока стока до и после введения паров спирта. В обоих случаях (контрольном и с 2-пропанолом) были измерены токи при напряжении сток–исток $U = -1$ В и трех значениях потенциала затвора. В атмосфере спирта наблюдается уменьшение тока при тех же напряжениях и ток насыщения составляет ~14 нА.

Потенциал затвора, В	0	–30	+30
Ток без спирта, нА	8	31	1
Ток в парах 2-пропанола, нА	10	14	0,4

Для нулевого потенциала затвора и напряжения сток–исток –0,204 В была исследована временная зависимость изменения проводимости канала после введения 9 % 2-пропанола в момент времени $t = 0$ мин. Уменьшение проводимости происходит по экспоненциальному закону (рис. 6) и может быть описано эмпирическим выражением

$$G = G(0) \cdot \exp(-t/\tau),$$

где $G(0)$ — начальная проводимость канала, а параметр $\tau = 2,5$ мин характеризует временную константу отклика системы.

Возможно несколько различных механизмов, лежащих в основе чувствительности ОСНТ-транзистора [13]. В транзисторе с барьером Шоттки изменение высоты барьера является преобладающим механизмом при адсорбции газа [14]. Так, было показано, что при введении паров спирта происходит изменение порогового напряжения транзистора. Вместе с тем, выше было показано,

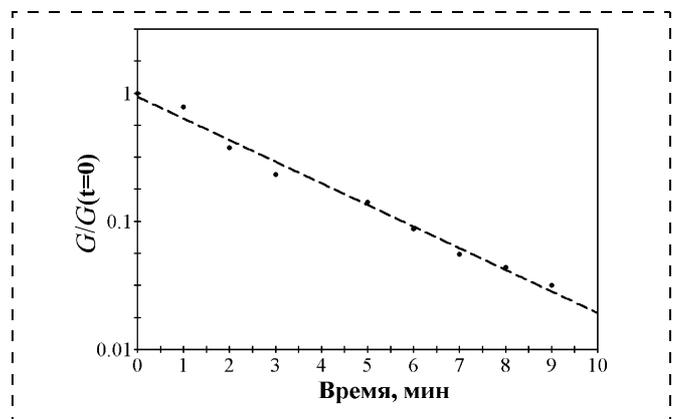


Рис. 6. Зависимость проводимости структуры на основе углеродной нанотрубки полупроводникового типа от времени при введении 9 % 2-пропанола (логарифмический масштаб, штриховая линия — экспоненциальная аппроксимация) (напряжение сток–исток $U_{\text{си}} = -0,2$ В)

что при отключении источника спиртового пара и вскрытии камеры восстановление характеристик структур идет в течение нескольких часов. Таким образом, предположительным механизмом работы ОСНТ-транзистора является химическая адсорбция паров спирта. Вариантами реализации данного механизма могут являться: легирование нанотрубок и пучков молекулами спирта [15] либо изменение потенциала подложки при заполнении зарядовых состояний оксида кремния.

Заключение

Таким образом, в работе были сформированы структуры на основе углеродных нанотрубок в виде пленок и одиночных пучков, чувствительных к парам летучих органических соединений. Было продемонстрировано воспроизводимое изменение электрических характеристик макетов сенсоров на основе пленок однослойных и многослойных углеродных нанотрубок, а также транзистора на основе нанотрубки полупроводникового типа при изменении концентрации паров этанола и 2-пропанола в атмосфере. Дальнейшая отработка методик высаживания сеток нанотрубок, равномерно распределенных на больших поверхностях, и функционализация в них нанотрубок полупроводникового типа позволит реализовать микросенсоры с высокой чувствительностью к присутствию молекул летучих органических соединений в атмосфере.

Выражаем благодарность Э. Г. Ракову (РХТУ им. Д. И. Менделеева) и А. В. Крестинину (ИПХФ РАН) за предоставленный материал углеродных нанотрубок.

Работа выполнена при поддержке гранта Президента Российской Федерации для государственной поддержки молодых российских ученых МК-1810.2005.8.

Список литературы

1. **Iijima S.** Helical microtubules of graphitic carbon // Nature. 1991. V. 354. P. 56–58.

2. **Харрис П.** Углеродные нанотрубы и родственные структуры. Новые материалы XXI века // Техносфера. 2003. 336 с.

3. **Dresselhaus M. S., Dresselhaus G.** Carbon nanotubes: synthesis, structure, properties and applications // In Topics in Applied Physics; Avouris, Ph., Eds. Berlin: Springer-Verlag. 2001. 448 p.

4. **Bachtold A., Hadley P., Nakanishi T., Dekker C.** Logic circuits with carbon nanotube transistors // Science. 2001. V. 249. P. 1317–1320.

5. **Бобринецкий И. И., Неволин В. К., Строганов А. А., Чаплыгин Ю. А.** Модуляция проводимости пучков однослойных углеродных нанотрубок // Микроэлектроника. 2004. № 5. С. 356–361.

6. **Аксенов А. И., Бобринецкий И. И., Неволин В. К., Симунин М. М.** Химические сенсоры на основе пучков углеродных нанотрубок для обнаружения низких концентраций молекул хлора в атмосфере // Микро- и наносистемная техника. 2005. № 12. С. 12–15.

7. **Аксенов А. И., Бобринецкий И. И., Неволин В. К., Симунин М. М.** Температурная зависимость электрического сопротивления структур на основе углеродных нанотрубок в атмосферных условиях // Датчики и системы. 2006. № 9. С. 60–64.

8. **Ulbricht H., Moos G., Hertel T.** Interaction of molecular oxygen with single-wall carbon nanotube bundles and graphite // Surface Science. 2003. V. 532–535. P. 852–856.

9. **Wongwiriyan W., Honda Sh., Konishi H.** et al. Single-walled carbon nanotube thin-film sensor for ultrasensitive gas detection // Japanese Journal of Applied Physics. 2005. V. 44. N. 16. P. L482–L484.

10. **Sin M. L. Y., Chow G. C. T., Fung C. K. M., Li W. J., Leong P., Wong K. W., Lee T.** Ultra-low-power alcohol vapor sensors based on multi-walled carbon nanotube // IEEE Transactions on Nanotechnology. 2006. V. 4. N. 3. P. 124–128.

11. **Yang C.-M., Kanoh H., Kaneko K., Yudasaka M., Iijima S.** Adsorption behaviors of HiPco single-walled carbon nanotube aggregates for alcohol vapors // J. Phys. Chem. B. 2002. V. 106. P. 8994–8999.

12. **Manohara H. M., Wong E. W, Schlecht E., Hunt B. D., Siegel P. H.** Carbon nanotube Schottky diodes using Ti-Schottky and Pt-Ohmic contacts for high frequency applications // 2005. V. 5. N. 7. P. 1469–1474.

13. **Someya T., Small J., Kim P., Nuckolls C., Yardley J. T.** Alcohol vapor sensors based on single-walled carbon nanotube field effect transistors // Nano Letters. 2003. V. 3. N. 7. P. 877–881.

14. **Heinze S., Tersoff J., Martel R.** et al. Carbon nanotubes as Schottky barrier transistors // Phys. Rev. Lett. 2002. V. 89. N. 10. P. 106801-1-106801-4.

15. **Romero H. E., Sumanasekera G. U., Kishore S., Eklund P. C.** Effects of adsorption of alcohol and water on the electrical transport of carbon nanotube bundles // J. Phys.: Condens. Matter 2004. V. 16. P. 1939–1949.

Г. М. Волков, д-р техн. наук, проф.,
МГТУ-МАМИ, г. Москва

НАНОКОМПОЗИТ СИСТЕМЫ УГЛЕРОД—УГЛЕРОД. БИОИНЖЕНЕРНЫЙ И МАШИНОСТРОИТЕЛЬНЫЙ ПОТЕНЦИАЛ

Уникальные свойства углеродного нанокompозита и наличие промышленной технологии производства натуральных изделий создали предпосылки для его применения в современном машиностроении и в медицинской технике. Углеродный нанокompозит по комплексу биоинженерных свойств рекомендован для клинического применения, используется для производства искусственных клапанов сердца, рекомендуется для изготовления эндопротезов, имплантантов и деталей аппаратов медицинской техники. Высокотемпературные свойства реализованы и рекомендуются для применения в современных тепловых машинах. Антифрикционные свойства реализованы и рекомендуются для применения в энергонасыщенных узлах трения современных машин новой техники при высоких параметрах рабочей среды. Сфера реализации свойств углеродного нанокompозита значительно шире рассмотренных направлений его технического применения.

В работе [1] представлен анализ теоретических предпосылок процесса скачкообразного изменения свойств вещества при определенном размере его дискретной единицы $d_{кр}$ [2]. При размере дисперсной частицы $< d_{кр}$ вследствие преобладающего влияния свободной валентности атомов на поверхности частицы над влиянием атомов в объеме вещество приобретает новые свойства. Дисперсная частица переходит в новое качество — она становится наночастицей, а их компактная консолидация при сохранении фазовых границ позволяет получить наноматериал.

Выдающиеся свойства наночастиц и материалов на их основе, которые вызвали всплеск научного и технического интереса к нанотехнологии, основаны на переходе вещества из одного состояния в другое. При размере дисперсной частицы $> d_{кр}$ свойства вещества определяются законами классической физики, а при $< d_{кр}$ начинают действовать законы квантовой механики. Теоретическое и экспериментальное изучение переходной области имеет большое научное и практическое значение для развития нанотехнологии.

Из рассмотренной гипотезы следует важный практический вывод для разработки наноматериалов конструкционного назначения. В качестве технологического приема консолидации

дисперсных частиц в монолитный материал часто используют введение дисперсного наполнителя в определенную матрицу с получением соответствующего композиционного материала системы матрица—наполнитель. Свойства получаемого композита зависят от свойств как наполнителя, так и матрицы. При введении в матрицу дисперсного наполнителя с размерами частиц $> d_{кр}$ свойства матрицы будут изменяться в соответствии с правилом аддитивности свойств композиционного материала. Введение частиц размером $< d_{кр}$ (т. е. наночастиц) приведет к многократному изменению свойств матрицы.

Представленные выше соображения послужили научной основой разработки углеродного нанокompозита [3].

Теоретическое значение $d_{кр}$ для углерода в аллотропной модификации графита составляет около 10 нм при экспериментальном значении по данным много-

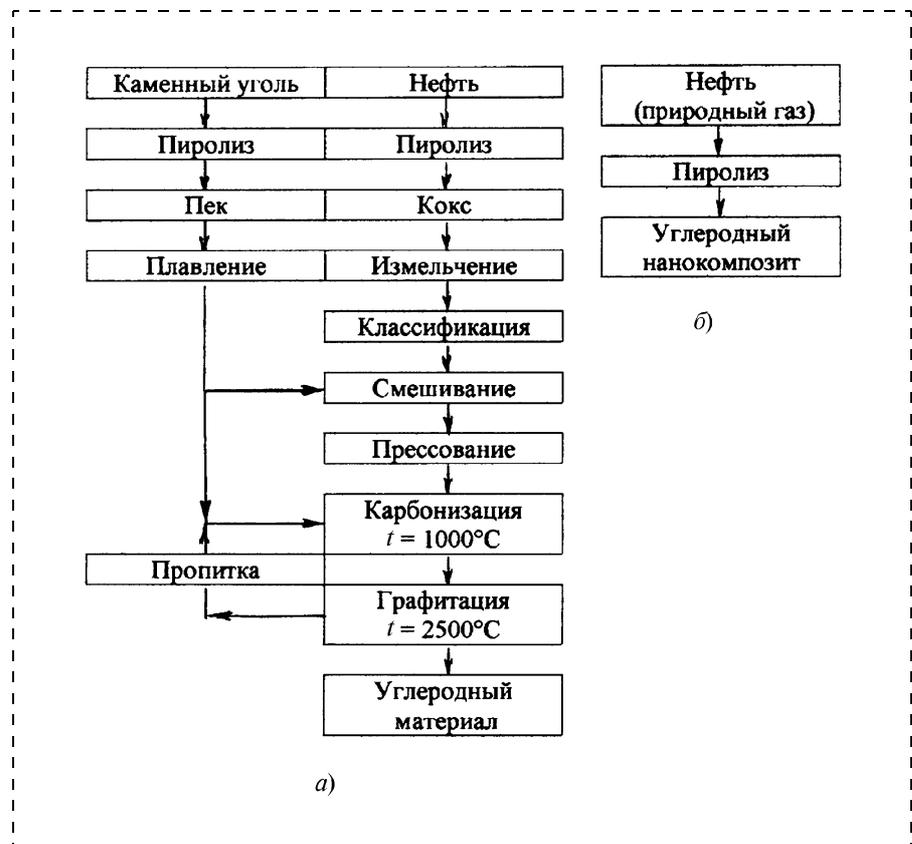


Рис. 1. Традиционная технология углеродных материалов (а) и технология углеродного нанокompозита (б)

летних испытаний сдаточных партий производственной продукции 9,2 нм.

Наноразмерный углеродный наполнитель формируется в едином технологическом процессе одновременно с углеродной матрицей, т. е. технология нанокompозита системы углерод—углерод является одностадийной. Этим технология углеродного нанокompозита выгодно отличается от традиционной технологии углеграфитовых материалов, включающей десять технологических переделов (рис. 1), некоторые из которых повторяются многократно, а технологический цикл производства достигает трех месяцев.

Свойства углеродного нанокompозита, как и следует из теоретического анализа, многократно превосходят свойства углеродных материалов традиционной технологии: по коэффициенту трения в жидких средах в 5 раз, по коэффициенту катодного распыления в 15 раз, по химической стойкости в окислительных средах до 300 раз [2]. Кроме того, углеродный нанокompозит обладает уникальным сочетанием свойств: он химически и биологически инертен, непроницаем для жидкости и газа, радиационно стоек, по высокотемпературной удельной прочности превосходит вольфрам. Такой комплекс свойств выгодно отличает углеродный нанокompозит от большинства традиционных материалов конструкционного назначения.

Промышленная технология углеродного нанокompозита отработана в производственных условиях на пластинах, трубах и натурных изделиях с габаритными размерами до 200 мм и толщиной стенки до 10 мм.

Перечисленные достоинства углеродного нанокompозита, подкрепленные наличием промышленной технологии его получения, создали предпосылки для практической реализации уникальных свойств углеродного

нанокompозита в современном машиностроении.

Наряду со многими другими потенциальными возможностями реализации уникального комплекса свойств углеродного нанокompозита практический интерес представляют также его антифрикционные свойства.

Антифрикционные свойства углерода в аллотропной модификации графита обеспечивают его широкое применение в конструкции машин самых различных отраслей техники. Углеродные материалы используют в узлах трения машин, где жидкая смазка трущихся поверхностей не допускается рабочими параметрами эксплуатации узла (высокие или, наоборот, низкие температуры, наличие агрессивной рабочей среды и др.) или техническими требованиями к перерабатываемому продукту (пищевые и специальные производства). Применение углеродных антифрикционных материалов в машиностроении дает большой экономический эффект.

В данной работе представлены реализованные в перспективных изделиях новой техники антифрикционные свойства углеродного нанокompозита, которые дают представление о потенциальных возможностях его использования для обеспечения работоспособности энергонасыщенных узлов трения современных машин.

Один из таких узлов трения функционирует в искусственном клапане сердца, разработка работоспособной конструкции которого является важнейшим этапом на пути создания искусственных органов системы кровообращения.

Работоспособность искусственного клапана сердца напрямую зависит от свойств материала его запирающего элемента, который испытывает самые жесткие нагрузки. Он должен выдерживать около 40 млн двойных (при открывании и закрывании клапана) ударов по седлу и ограничительным дужкам клапана в

год в химически активной среде нативной крови.

Кроме высокого уровня прочностных характеристик и низкого коэффициента трения материал запирающего элемента клапана должен обладать также определенным комплексом медико-биологических свойств.

Материалы проточной части искусственного клапана сердца должны иметь высокую химическую стойкость в среде нативной крови и не должны провоцировать образование тромбов. По уровню тромборезистентности углеродный нанокompозит превосходит все известные материалы.

Материал, предназначенный для эндопротезирования, не должен вызывать общего токсического действия на организм, его контакт с биологическими тканями не должен вызывать местных патологических реакций. Комплекс медико-биологических испытаний показал отсутствие местного раздражающего, общетоксического и канцерогенного действия углеродного нанокompозита на организм. Углеродный нанокompозит рекомендован для клинического применения.

Запирающие элементы зарубежных фирм представляют собой сложную конструкцию с защитным покрытием из низкотемпературного пироуглерода толщиной до 200 мкм [4]. Получению покрытия большей толщины, а тем более монолитного конструкционного материала, работоспособного в условиях запирающего элемента искусственного клапана сердца, препятствовала принятая зарубежными учеными неадекватная действительности модель формирования надмолекулярной структуры пиролитических отложений углерода. Из теоретических воззрений зарубежных ученых следовало, что получение углеродного нанокompозита в виде конструкционного материала невозможно, а поэтому такая возможность ими и не рассматривалась.

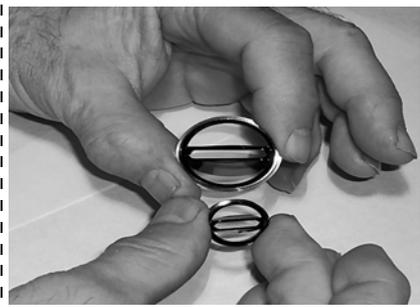


Рис. 2. Отечественные искусственные клапаны сердца, изготовленные целиком из углеродного нанокompозита

Комплекс свойств углеродного нанокompозита позволил создать запирающий элемент в виде монолитной детали [5], что упрощает конструкцию и повышает его надежность. Стендовые испытания показали, что ресурс безотказной работы нанокompозита в данных условиях соизмерим с продолжительностью жизни человека с пятикратным запасом. Все искусственные клапаны сердца российского производства имеют запирающие элементы монолитной конструкции из нанокompозита системы углерод—углерод. Зарубежные производители искусственных клапанов сердца после получения возможности изучить клапаны российского производства были весьма озадачены монолитной конструкцией его запирающего элемента, изготовленного из невозможного по западным представлениям материала.

Уникальные свойства углеродного нанокompозита обеспечили успешное завершение опытно-конструкторских работ по созданию перспективной конструкции искусственного клапана сердца, в котором все элементы проточной части выполнены целиком из углеродного нанокompозита (рис. 2). Такая конструкция исключает прямой контакт нативной крови с подверженными тромбообразованию металлическими деталями искусственного клапана сердца.

Приведенный пример реализации комплекса медико-техни-

ческих свойств углеродного нанокompозита в качестве конструкционного материала искусственного клапана сердца дает представление о потенциальных возможностях использования его биоинженерных свойств в медицинской технике.

Антифрикционные свойства углеродного нанокompозита реализованы также в традиционных элементах современного машиностроения. Отмеченный комплекс свойств углеродного нанокompозита обеспечивает работоспособность перспективных машин, приборов и технических устройств самого различного назначения.

Обширной областью реализации антифрикционных свойств углеродного нанокompозита являются торцевые уплотнения вращающихся валов, в качестве которых могут быть использованы только непроницаемые материалы. Высокая пористость антифрикционных графитов традиционной технологии, которая может достигать 30 %, исключает их применение в конструкции торцевых уплотнений. Проницаемость антифрикционных графитов устраняют путем их пропитки терморезистивными полимерами или насыщения сплавами антифрикционного назначения.

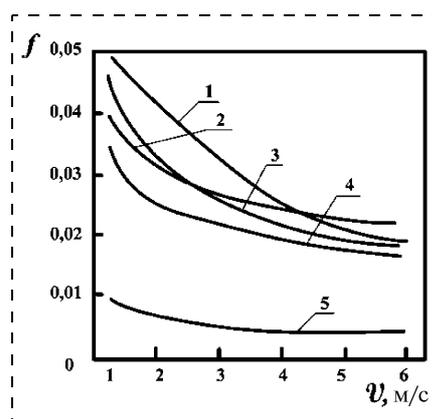


Рис. 3. Сравнительные испытания антифрикционных материалов в режиме торцевого уплотнения воды при скольжении по стали 30X13:

1, 3, 4 — антифрикционные графиты, пропитанные антифрикционными сплавами CO5 и B83; 2 — антифрикционный графит, пропитанный фторопластом; 5 — углеродный нанокompозит

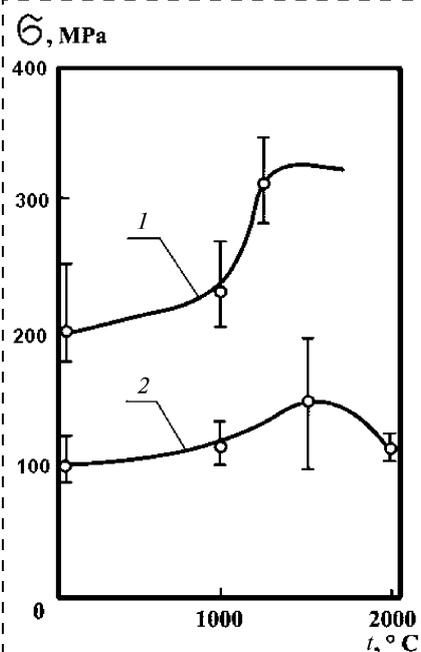


Рис. 4. Температурная зависимость прочностных характеристик углеродного нанокompозита:

1 — предел прочности при изгибе; 2 — предел прочности при растяжении

Однако это резко снижает рабочую температуру эксплуатации торцевого уплотнения до температур термического разложения полимера или плавления металла.

Сравнительные испытания антифрикционных графитов, пропитанных металлами, и углеродного нанокompозита в условиях трения по стали 30X13 в режиме торцевого уплотнения воды показали, что по коэффициенту трения нанокompозит в 5 раз превосходит традиционные материалы (рис. 3). Преимущество нанокompозита перед металлопропитанными антифрикционными графитами состоит в практическом отсутствии температурных ограничений: углеродный нанокompозит не теряет своих физико-механических свойств до 2000 °C (рис. 4).

Углеродный нанокompозит служит эффективным антифрикционным материалом для торцевых уплотнений, работающих при высоких окружных скоростях вращения и высоких параметрах рабочей среды энергона-

сыщенных узлов трения современных машин новой техники.

О потенциальных возможностях улучшения технико-экономических показателей современных машин за счет реализации высокотемпературных свойств углеродного нанокompозита дает представление отмеченный ранее [2] опыт производственной эксплуатации термоядерных реакторов типа Токомак. Применение углеродного нанокompозита позволило существенно улучшить технико-экономические показатели термоядерного реактора.

Замена диафрагмы из сплава вольфрам—рений, которая фиксирует в реакторе водородный плазменный шнур с температурой 100 млн °С, на диафрагму из углеродного нанокompозита обеспечила уменьшение потери мощности на излучение плазмы в 3 раза, увеличение числа полезных импульсов в 5 раз и снижение интенсивности рентгеновского излучения в 20 раз. В пересчете на применение углеродного нанокompозита в качестве материала первой стенки термоядерного реактора электростанции тепловой мощностью 5000 МВт это означает выработку дополнительного количества электрической энергии в объеме 10 млрд кВт·ч/год. К стоимости дополнительной электроэнергии следует прибавить экономический эффект от замены дефицитных и дорогостоящих тугоплавких металлов (рений примерно в 1,5 раза дороже золота) и 20-кратного уменьшения толщины биозащитной облицовки термоядерного реактора. Диафрагма из углеродного нанокompозита успешно выдержала 8000 рабочих циклов термоядерного реактора без следов видимых разрушений.

Перспективной разновидностью опор валов, получивших применение в современном машиностроении, являются газодинамические подшипники. В установленном режиме работы газодинамического подшипника

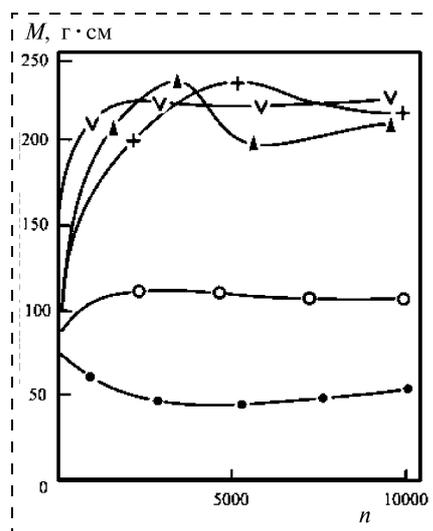


Рис. 5. Влияние числа n циклов пуск—останов на пусковой момент M трения по стали ШХ15 газодинамических упорных подшипников из антифрикционных материалов:

▲ — бронза; + — антифрикционный сплав; ∇ — корундовая керамика; ○ — антифрикционный графит, пропитанный антифрикционным сплавом; ● — углеродный нанокompозит

вращающийся вал опирается на упругую газовую прослойку между валом и вкладышем подшипника. К основным достоинствам газодинамических подшипников следует отнести отсутствие потерь на трение, работоспособность конструкции в широком диапазоне температур и практическое отсутствие ограничений по диаметру вала. Угловые скорости вала в газодинамических подшипниках могут достигать 300 м/с, а масса ротора до 1 т и число оборотов до 1 млн об/мин.

Однако режим газовой смазки реализуется только при числе оборотов вала выше критического значения. При пуске и остановке агрегата газовая смазка отсутствует и подшипник работает в режиме сухого трения.

Материалы газодинамического подшипника должны обладать низким коэффициентом трения и незначительным износом при пуске и останове машины, а также размерной и структурной стабильностью материала при кратковременных каса-

ниях высокооборотного вала в аварийной ситуации.

Наиболее полно этим требованиям удовлетворяют углеродные материалы. Их важным преимуществом является отсутствие схватывания с металлической поверхностью вала в условиях динамического торможения.

На рис. 5 показаны результаты сравнительных испытаний антифрикционных материалов различных классов и углеродного нанокompозита в условиях трения по стали ШХ15 в режиме газодинамического подшипника. Наилучшим из углеродных антифрикционных материалов для газодинамических подшипников является нанокompозит. Он хорошо работает практически с любым контртелом. Рекомендуемой парой является углеродный нанокompозит—сталь ШХ15 с хромированной рабочей поверхностью. У нанокompозита практически не обнаружены следы износа после 2000 циклов пуск—останов при минимальном значении коэффициента трения при трогании с места.

В заключение автор выражает глубокую признательность всем многочисленным сотрудникам самых разных организаций самого различного профиля за сильный вклад в реализацию свойств углеродного нанокompозита в передовых конструкциях новой техники.

Список литературы

1. Волков Г. М. Анизотропия химической активности графита к окислительным агентам // Теоретическая и экспериментальная химия. 1969. Т. 5. № 1.
2. Волков Г. М. Некоторые физические и химические свойства углеситалла // Нано- и микросистемная техника, № 5. 2006.
3. Волков Г. М., Калугин В. И., Сысков К. И. Технологические проблемы перехода от микро- к наносистемам консолидации дисперсных частиц вещества // Доклады АН СССР. 1968. Т. 183. № 2.
4. Bokros J. C. Chemistry and Physics of Carbon. N. Y.: 1969. V. 5.
5. Волков Г. М. и др. Авторское свидетельство СССР № 1102184 от 6.12.1977.

КОНСТРУИРОВАНИЕ И МОДЕЛИРОВАНИЕ НМСТ

УДК 621.3.049.77

А. В. Гридчин¹, В. А. Колчужин²,
В. А. Гридчин¹, У. Г. Герлах³,

¹Новосибирский государственный
технический университет,
e-mail: algrid@yandex.ru

²Technische Universität Chemnitz,
Professur für Microsystemtechnik, Chemnitz,
Deutschland

³Technische Universität Dresden,
Institut für Festkörperelektronik, Dresden,
Deutschland

ИССЛЕДОВАНИЕ ЧЕТЫРЕХКОНТАКТНЫХ ТЕНЗОЧУВСТВИТЕЛЬНЫХ СТРУКТУР МЕТОДОМ КОНЕЧНО-ЭЛЕМЕНТНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

Даны основные понятия о связанном структурно-тензорезистивном конечно-элементном анализе, представлены модели четырехконтактного тензопреобразователя для сенсоров давления балочного и мембранного типа, созданные в среде ANSYSTM и рассчитанные с его помощью, приведены результаты их расчетов и дано сравнение с результатами, полученными аналитически.

Введение

В настоящее время среди твердотельных сенсоров давления значительное место занимают сенсоры на тензорезистивном эффекте. Общепринятой электрической схемой для них является мостовая схема Уитстона, состоящая из четырех тензорезисторов, расположенных в различных точках упругого элемента. При этом используется продольный и поперечный тензорезистивные эффекты. В кремнии может реализовываться и сдвиговый тензорезистивный эффект, для которого тензочувствительные элементы (ТЧЭ) имеют специальную топологию. Особенностью таких ТЧЭ является наличие односвязной области растекания тока с четырьмя контактами. Теория и характеристики таких ТЧЭ рассматривались в ряде работ [1–8].

Обычно четырехконтактные ТЧЭ имеют область растекания тока (ОРТ) прямоугольной фор-

мы с двумя токовыми контактами, покрывающими короткую сторону прямоугольника, и двумя потенциальными контактами на длинных сторонах (рис. 1). При наличии сдвиговых механических напряжений T_{12} или $T_{11} - T_{22}$ тензор удельного сопротивления кремния становится недиагональным, причем недиагональные компоненты $\rho_{12} = \rho_{21}$ пропорциональны механическим напряжениям. Появление недиагональных компонентов приводит к возникновению поперечной разности потенциалов, регистрируемой на потенциальных контактах. Нахождение поперечной разности потенциалов (выходного сигнала тензопреобразователя) — существенно более сложная задача, чем для мостовой схемы из обычных тензорезисторов, и в аналитической форме может быть решена только для простейших конфигураций электродов и форм ОРТ.

Например, если область растекания тока — прямоугольная, а потенциальные контакты — точечные, то выходной сигнал ТЧЭ на сдвиговом эффекте можно представить в форме

$$V = E \frac{\Delta_{12}}{\sqrt{1 + \Delta_{11}} \sqrt{1 + \Delta_{12}}} \frac{B}{A} \Phi\left(\frac{B}{A}\right), \quad (1)$$

где E — разность потенциалов между токовыми контактами; $\Delta_{ij} = \frac{\sigma_{ij}}{\sigma_0} - \delta_{ij}$ ($i, j = 1, 2$) — относительное изменение проводимости из-за деформации в системе координат, связанной со сторонами ОРТ (рис. 1); $\Phi\left(\frac{A}{B}\right) = \frac{8}{\pi^2} \frac{A}{B} \sum_n \frac{(-1)^n}{(2n+1)^2} \times$

$\times \tanh\left[\frac{(2n+1)\pi}{2} \frac{B}{A}\right]$ — геометрическая функция,

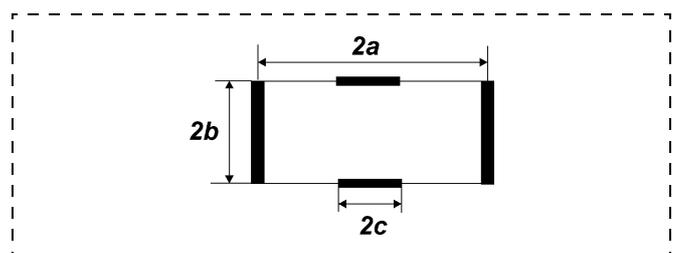


Рис. 1. Основные размеры ТЧЭ

в которой $A = \frac{a}{\sqrt{1 + \Delta_{11}}}$, $B = \frac{b}{\sqrt{1 + \Delta_{22}}}$ — приведенные геометрические размеры ОРТ.

Функция Φ учитывает влияние геометрии ОРТ и всех электродов на выходной сигнал. Ее расчет представляет наибольшую трудность при проектировании ТЧЭ на сдвиговом тензорезистивном эффекте. Для решения задачи обычно прибегают к технике конформного отображения [7, 8], либо к численным методам решения краевой задачи о распределении электрического потенциала в деформированном полупроводнике [3, 4, 6].

Появившиеся конечно-элементные методы моделирования, реализованные в пакете программ ANSYSTM и некоторых других, позволили по-новому подойти к проектированию сенсоров. При этом может быть обеспечена высокая точность определения всех характеристик ТЧЭ, если правильно выбраны тип и число конечных элементов и способ описания граничных условий. Роль этих факторов особенно существенна вблизи мест, где имеются сильные координатные зависимости рассматриваемых величин, а именно вблизи электродов или краев упругого элемента (жестко заземленной балки или мембраны). Используя процедуру построения предварительной диагональной матрицы удельного сопротивления деформированного кремния и обычный подход к расчету потенциала электрического поля в рамках пакета ANSYSTM версии 5.4, авторы работы [4] проанализировали четырехконтактный ТЧЭ и сравнили с данными, полученными как методом конформного отображения [2], так и другими численными методами [3]. Было выявлено хорошее согласие всех методов применительно к случаю точечных потенциальных контактов и расхождение для случая широких потенциальных контактов.

В настоящее время одна из наиболее современных версий ANSYSTM — версия 8.1 — включает возможность анализа тензорезистивного эффекта и не требует специальной модификации программы, как это было в предыдущих версиях. Кроме того, версия 8.1 позволяет проводить и связанный анализ, когда в рамках единой модели можно исследовать совместное влияние на модель нескольких физических полей.

В данной статье рассматривается применимость связанного конечно-элементного анализа, реализованного в версии ANSYSTM 8.1 для проектирования ТЧЭ на сдвиговом тензорезистивном эффекте.

Формирование моделей ТЧЭ для связанного конечно-элементного анализа

Связанный конечно-элементный тензорезистивный анализ — одна из разновидностей свя-

занного анализа, реализованного в пакете программ моделирования ANSYSTM. Он используется для определения изменений распределения электрического поля или растекания тока, возникающих благодаря приложенным силам или давлению. В таком анализе результаты, полученные в первой итерации, используются в качестве начальных условий для проведения второй итерации.

Послеоперационная обработка данных, полученных в результате анализа, позволяет рассчитать, например, выходное напряжение и входное сопротивление ТЧЭ, учитывая при этом либо изотропные, либо анизотропные свойства кремния. Для реализации связанного тензорезистивного анализа в программе ANSYSTM версия 8.1 и выше предусмотрены несколько типов конечных элементов: PLANE223 (двумерный), SOLID226 (трехмерный) и SOLID227 (трехмерный 20-узловой) [9].

Матричная система уравнений для связанного тензорезистивного конечно-элементного анализа имеет вид

$$\begin{bmatrix} [K_S] & 0 \\ 0 & [K_G(\{\varepsilon\})] \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \{u\} \\ \{\varphi\} \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \{F\} \\ \{I\} \end{Bmatrix}, \quad (2)$$

где $[K_S]$ — глобальная конечно-элементная матрица жесткости; $[K_G]$ — глобальная конечно-элементная матрица проводимости; $\{I\}$ — вектор узловых токов, протекающих через контакты; $\{F\}$ — вектор узловых сил; $\{u\}$ — вектор узловых перемещений; $\{\varphi\}$ — вектор узловых потенциалов; $\{\varepsilon\}$ — вектор компонент тензора деформации.

Так как электропроводность зависит от деформации, то система уравнений (2) решается последовательно. На первой итерации находятся узловые перемещения, вызванные действием внешней силы (давления):

$$\{u\} = [K_S]^{-1}\{F\}. \quad (3)$$

На второй итерации вычисляются компоненты тензора механических напряжений

$$\{\sigma\} = [D] \cdot [B] \cdot \{u\}, \quad (4)$$

где $[D]$ — матрица упругости; $[B]$ — матрица связи перемещений и деформаций.

Для повышения точности расчета компоненты тензора механических напряжений вычисляются в Гауссовых точках интегрирования элемента. На второй итерации находятся узловые потенциалы в деформированном теле:

$$\{\varphi\} = [K_G]^{-1}\{I\}. \quad (5)$$

Для расчета изменения электропроводности кремния p -типа используется линейное по деформации приближение [1, 10].

При создании конечно-элементной модели ТЧЭ на сдвиговом эффекте было учтено, что для достижения максимальной чувствительности ТЧЭ его нужно располагать вблизи края жесткого заземления на поверхности кремниевой мембраны под углом 45° к кристаллографическим осям, связанным со сторонами упругого элемента, как указано в [3] (рис. 2). При этом в основу модели были положены следующие параметры мембраны: кристаллографическая плоскость (100), тип проводимости кремния p , ориентация сторон $x \parallel [110]$, $y \parallel [1\bar{1}0]$, $z \parallel [001]$, размеры $2000 \times 2000 \times 30$ мкм.

При создании конечно-элементной модели для осуществления связанного тензорезистивного анализа были использованы значения констант пьезосопротивления, взятые из экспериментов, описанных в [10]: $\pi_{11} = 6,6 \cdot 10^{-11} \text{ Па}^{-1}$, $\pi_{12} = -1,2 \cdot 10^{-11} \text{ Па}^{-1}$, $\pi_{44} = 142 \cdot 10^{-11} \text{ Па}^{-1}$.

В качестве нагрузки было использовано давление 100 кПа, приложенное по нормали к плоскости мембраны. Питание осуществлялось либо от источника постоянного напряжения +5 В, либо от источника постоянного тока 1 мА. Термомеханические напряжения не принимались в расчет.

Сформированный на поверхности мембраны ТЧЭ был подключен как преобразователь Холла: одна из диагоналей была питающей, а с другой снимался выходной сигнал, как показано на рис. 3.

При построении конечно-элементной модели ТЧЭ было принято во внимание то, что глубина тензорезистивного слоя много меньше толщины

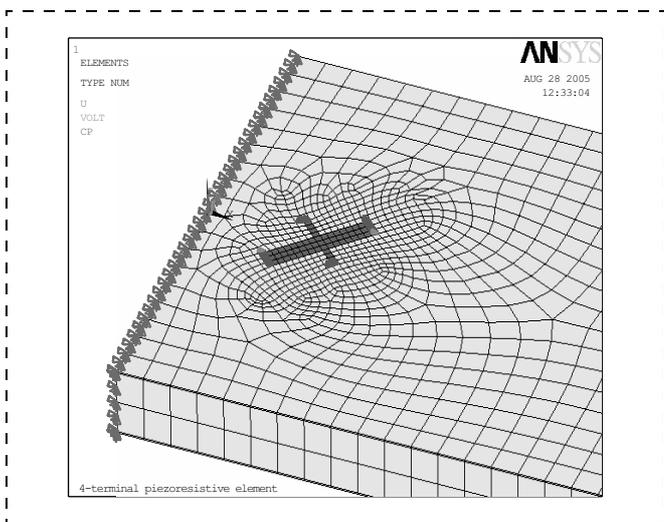


Рис. 2. Конечно-элементная модель УЭ с расположенным на его поверхности ТЧЭ

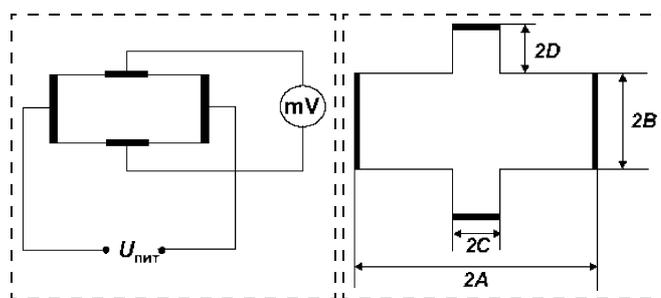


Рис. 3. Схема питания модели Рис. 4. Основные размеры ОРТ крестообразной формы

мембраны. В качестве рабочего варианта в данном исследовании был взят случай тензорезистивного слоя p -типа глубиной 3 мкм и поверхностным сопротивлением $\rho_S = 1070 \text{ Ом/кв.кв.}$. Была использована техника адаптивного разбиения на элементы с шириной 25 мкм для самой ОРТ и 50 мкм для всей остальной области мембраны.

В рамках используемой модели длина ОРТ была принята равной 250 мкм и оставалась неизменной. Ширина ОРТ в ходе анализа могла изменяться в долях длины от 0,1 до 1. В тех же долях могла изменяться и ширина потенциальных контактов.

В реальных тензопреобразователях структура потенциальных контактов отличается от идеализированной, представленной на рис. 1. ОРТ может иметь крестообразную форму, в которой металлические электроды наносятся на край потенциального контакта, представляющего собой полосу определенной длины $2D$ и ширины $2C$ (рис. 4). При такой геометрии имеется возможность влиять как на выходное сопротивление тензопреобразователя, так и на геометрическую функцию, которая теперь зависит от трех переменных: $F = F(A, C, D)$.

В ходе математического моделирования металлические контакты предполагались нанесенными на плоскости торцов соответствующих электродов.

Результаты расчета

При питании от генератора напряжения E выходной сигнал для ОРТ с конечной шириной потенциальных контактов (см. рис. 1) определяется выражением

$$V_{out} = \frac{B}{A} \frac{\Delta_{12}}{\sqrt{1 + \Delta_{11}} \sqrt{1 + \Delta_{22}}} E \Phi_E \left(\frac{B}{A}, \frac{C}{A} \right). \quad (6)$$

Для длинных ОРТ при точечных размерах потенциальных контактов, когда $\frac{B}{A}, \frac{C}{A} \rightarrow 0$, геометрическая функция $\Phi_E \rightarrow 1$.

В случае питания от генератора тока $E = z_{11}I$, где z_{11} — входное сопротивление тензопреобразователя:

$$z_{11} = \rho_S \frac{1}{\sqrt{1 + \Delta_{11}} \sqrt{1 + \Delta_{22}}} \frac{A}{B} F_1\left(\frac{C}{A}\right). \quad (7)$$

Функция $F_1\left(\frac{C}{A}\right)$ учитывает влияние потенциальных контактов на входное сопротивление. При $\frac{C}{A} \rightarrow 0$ функция $F_1 \rightarrow 1$. Выходной сигнал ТЧЭ при питании от генератора тока определяется выражением

$$V_{out} = \rho_S I \frac{\Delta_{12}}{(1 + \Delta_{11})(1 + \Delta_{22})} \Phi_I\left(\frac{B}{A}, \frac{C}{A}\right), \quad (8)$$

где

$$\Phi_I\left(\frac{B}{A}, \frac{C}{A}\right) = F_1\left(\frac{C}{A}\right) \Phi_E\left(\frac{B}{A}, \frac{C}{A}\right) \quad (9)$$

— геометрическая поправочная функция, отличная от указанной в (6). Соотношение (9) выражает связь между геометрическими поправочными функциями Φ_I и Φ_E .

При проектировании ТЧЭ влияние потенциальных контактов стремятся сделать малым, обеспечивая условие $C/A \rightarrow 0$, так что функция F_1 близка к 1 и обе геометрические функции Φ_E и Φ_I отличаются не столь сильно, причем $\Phi_I < \Phi_E$.

На рис. 5 представлены результаты расчетов токовой геометрической поправочной функции F_I для областей растекания тока с различной степенью вытянутости и шириной потенциальных контактов, полученные методом связанного тен-

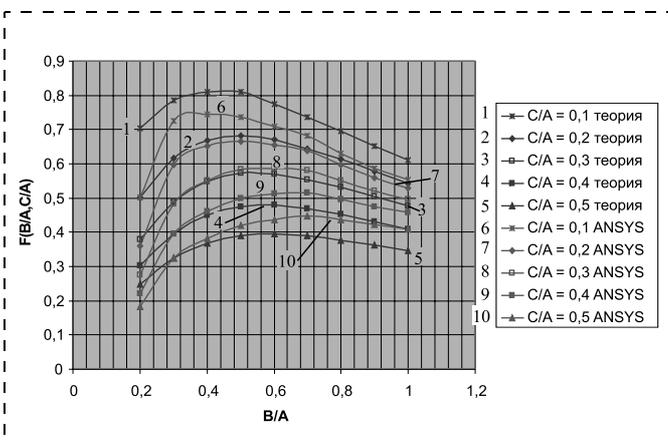


Рис. 5. Сравнение токовых геометрических поправочных функций, рассчитанных по теории и методом связанного структурно-тензорезистивного конечно-элементного анализа

зорезистивного конечно-элементного анализа с помощью пакета программ ANSYS™ 8.1, а также методом конформного отображения. Оба метода хорошо согласуются между собой особенно для широких потенциальных контактов. Для ТЧЭ с длинными ОРТ существенным оказывается шунтирующее влияние потенциальных электродов, а для коротких образцов с формами, близкими к квадратной, заметным становится влияние как потенциальных, так и токовых электродов.

В то же время следует заметить, что в работе [4] рассматривалась не токовая, а потенциальная геометрическая поправочная функция Φ_E , которая отличается от Φ_I тем сильнее, чем больше длина потенциальных контактов. Для точечных контактов $\Phi_I = \Phi_E$, что и выявлено в работе [4] при сравнении результатов, полученных в [2, 3, 4].

На рис. 6 представлены зависимости геометрической поправочной функции $F_1\left(\frac{B}{A}, \frac{C}{A}\right)$ от ширины потенциальных контактов при токовых контактах с различным отношением B/A , полученные методом конечно-элементного моделирования, которые иллюстрируют возрастающую роль шунтирующего действия потенциальных электродов по мере роста их размеров.

Сильнее всего уменьшение входного сопротивления z_{11} для длинных областей растекания тока при $B/A \sim 0,1 \dots 0,2$, когда участки образца длиной порядка C/A не вносят вклад в сопротивление, а ток течет через потенциальные электроды. Отличие между функциями Φ_E и Φ_I становится заметным, что и было выявлено в [4].

Ослабление шунтирующего действия потенциальных электродов возможно не только уменьшением их размеров, но и переходом к крестообразной форме ОРТ (см. рис. 4). При этом геометрические поправочные функции Φ_E и Φ_I начинают

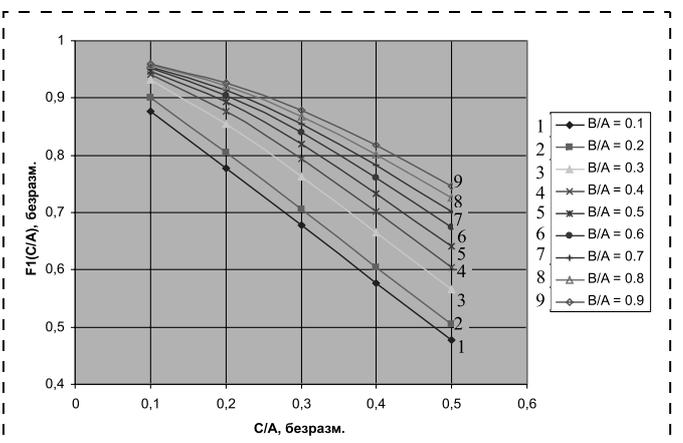


Рис. 6. Поправочная функция коэффициента формы, рассчитанная методом конечных элементов

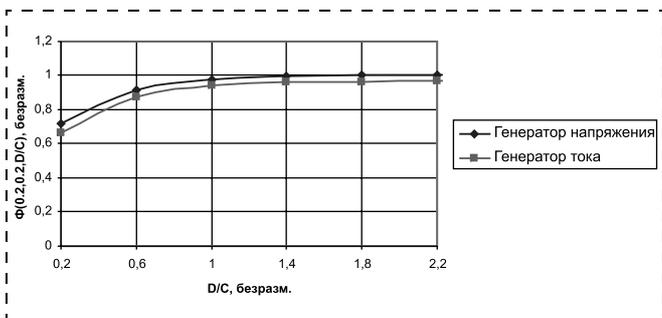


Рис. 7. Токовая геометрическая поправочная функция для ТЧЭ с крестообразной ОРТ и потенциальных контактах различной длины ($B/A = 0,2$, $C/A = 0,2$)

также зависеть и от длины потенциальных контактов $2D$, например $\Phi_I = \Phi\left(\frac{B}{A}, \frac{C}{A}, \frac{D}{C}\right)$. Увеличение длины $2D$ в крестообразной топологии приводит к возрастанию функций Φ при фиксированных других размерах ОРТ. На рис. 7 представлен пример такой зависимости, полученной расчетным путем с помощью конечно-элементного моделирования для ОРТ с параметрами $\frac{B}{A} = \frac{C}{A} = 0,2$.

При длине потенциального контакта D , превышающей $1,4C$ (отношение $D/C \geq 1,4$), дальнейшее увеличение его длины не приводит к возрастанию выходного сигнала ТЧЭ, и функция $\Phi_I(0,2; 0,2; D/C)$ выходит на насыщение. Выходной сигнал ТЧЭ с крестообразной ОРТ при этом близок к выходному сигналу ТЧЭ с прямоугольной ОРТ, имеющей параметр $B/A = 0,2$ и точечные потенциальные контакты. По выходному сопротивлению сравниваемые ТЧЭ, однако, заметно различаются.

Выводы и заключение

Характеристики тензорезистивных чувствительных элементов на сдвиговом эффекте зависят от геометрии области растекания тока и размеров токовых и потенциальных контактов. Применение связанного структурно-тензорезистивного конечно-элементного анализа, реализованного в пакете ANSYS™ версия 8.1, оказывается эффективным средством исследования характеристик ТЧЭ и их оптимизации. Числовые результаты, полученные в результате такого анализа, находятся в хорошем соответствии с данными, полученными методом конформного отображения. Однако сравнение геометрических поправочных функций различ-

ных тензопреобразователей становится корректным, если при этом ясно указывать режим питания сравниваемых тензопреобразователей (источник тока или источник напряжения).

Представленное в статье исследование было выполнено в Институте твердотельной электроники технического университета г. Дрезден (Германия) под руководством д-ра техн. наук, проф. У. Г. Герлаха на средства гранта, предоставленного в рамках программы научно-технического сотрудничества "Михаил Ломоносов", реферат 325, проект № А/05/58515, поддержанной Германской Службой академических обменов (ДААД) и Министерством образования и науки Федерального агентства по образованию Российской Федерации. Участники проекта выражают признательность этим организациям за финансовую поддержку, а коллективу Института твердотельной электроники технического университета г. Дрезден — за содействие в организации процесса исследования.

Список литературы

1. **Гридчин В. А., Драгунов В. П.** Физика микросистем: Учеб. пособие. Новосибирск: НГТУ, 2004.
2. **Gridchin A. V., Gridchin V. A.** The four-terminal piezotransducer: theory and comparison with piezoresistive bridge // Sensors and Actuators A: Physical. 1997. V. 58. P. 219–223.
3. **Bao M. H., Qi W. J., Wang Y.** Geometric design rules of four-terminal gauge for pressure sensors // Sensors and Actuators A: Physical. 1989. V. 18. P. 149–156.
4. **Buhhold R., Gollee R., Nakadal A., Gerlach G.** A Novel Approach to Modeling the Transfer Functions of Four-Terminal-Transducer Pressure Sensors Within a Single Simulation Tool // Sensors and Actuators A: Physical. 2000. V. 80. P. 15–22.
5. **Гридчин В. А.** Проектирование тензопреобразователей на эффекте поперечной пьезо-ЭДС с учетом размеров потенциальных контактов // Физические основы полупроводниковой тензометрии: Сб. Новосибирск: Новосибир. электротехн. ин-т. 1984. С. 109–119.
6. **Kanda Y.** Optimum design considerations for silicon pressure sensors using a four-terminal gauge // Sensors and Actuators. 1983. V. 4. P. 199–206.
7. **Gridchin A. V.** An Application of Conform Mapping to the Calculation of FTSP Transducer with Various Geometrical Form // 3rd Siberian Russian Workshop and Tutorials on Electron Devices and Materials EDM'2002, Proc. Novosibirsk, Russia. 2002. V. 1. P. 49–57.
8. **Gridchin A. V.** Calculation of z_{12} Resistance for the FTSP Transducer as an Element of External Electrical Circuit // 3rd Siberian Russian Workshop and Tutorials on Electron Devices and Materials EDM'2002, Proc. Novosibirsk, Russia. 2002. V. 1. P. 88–92.
9. **ANSYS Users Guide, Theory Reference manual** // ANSYS Inc., Canonsburg, USA. 2002.
10. **Гридчин А. В.** Разработка теоретических основ проектирования сенсоров давления с тензочувствительными элементами специальной формы // Автореф. дисс. канд. техн. наук. Новосибирск: ИГТУ. 1999. 24 с.

В. М. Любимский, д-р техн. наук, проф.,
Новосибирский государственный технический
университет

ИЗГИБЫ КРУГЛОЙ И ПРЯМОУГОЛЬНОЙ ДИАФРАГМ ПРИ ДЕЙСТВИИ ЭЛЕКТРОСТАТИЧЕСКОГО ПРИТЯЖЕНИЯ И ПОПЕРЕЧНОЙ НАГРУЗКИ

Получены дифференциальные уравнения изгиба изотропных круглой и прямоугольной диафрагм при совместном действии электростатического притяжения и поперечной нагрузки. Найдены приближенные решения полученных дифференциальных уравнений для жестко закрепленных диафрагм несколькими методами. На основании сравнения результатов вычислений показано, что относительные прогибы центров квадратной и прямоугольной (с отношением сторон 1:2) диафрагм, вычисленные двумя методами с использованием двух аппроксимирующих функций, имеют близкие значения. В то же время формы изогнутых поверхностей диафрагм для двух рассмотренных аппроксимирующих функций — разные.

Введение

Модель неконтролируемого электростатического притяжения между двумя электродами, один из которых представляет круглую или квадратную жестко закрепленную диафрагму при совместном действии электростатического притяжения и однородной поперечной нагрузки рассматривалась в работах [1–3]. Действие электрического поля в работах [1–3] рассматривалось как давление, и для расчетов прогибов диафрагм использовалось дифференциальное уравнение, решение которого описывает прогибы диафрагм при действии поперечной нагрузки [4], однако при этом ошибочно предполагалось, что электрическое поле между электродами однородно, как это имеет место в простейшей электромеханической системе [5]. Приближенные решения дифференциального уравнения получены методом Бубнова—Галеркина.

В работе [6] получено дифференциальное уравнение изгиба длинной изотропной пластинки при совместном действии электростатического притяжения и поперечной нагрузки и получены приближенные решения этого уравнения несколькими методами для жесткого заземления пластинки по двум длинным сторонам.

Целью настоящей работы является вывод дифференциальных уравнений, решения которых описывают прогибы круглой и прямоугольной

диафрагм при малых, по сравнению с толщиной диафрагмы, прогибах при совместном действии на диафрагму электростатического притяжения и поперечной нагрузки, а также решение этих уравнений несколькими методами и сравнение результатов решений между собой.

Теория

Рассмотрим прогибы верхнего электрода (диафрагмы), малые по сравнению с его толщиной, в системе, состоящей из двух проводящих пластин (электродов), которые в горизонтальной плоскости имеют одинаковые размеры, но $h \ll H$ (рис. 1) при совместном действии на электроды поперечной нагрузки P и электрического поля, созданного не зависящей от координат разностью потенциалов между электродами U .

Дифференциальное уравнение изгиба диафрагмы может быть получено так же, как в [6]: работа по упругой деформации диафрагмы и сообщению заряда Q конденсатору, образованному двумя электродами, совершается за счет внешнего источника тока A_1 и поперечной нагрузки A_2 и равна энергии электрического поля между электродами E_1 и энергии упругой деформации диафрагмы E_2 :

$$A_1 + A_2 = E_1 + E_2. \quad (1)$$

Для круглой диафрагмы радиуса a

$$A_1 = QU = 2\pi\epsilon\epsilon_0 U^2 \int_0^a \frac{dr}{d-w(r)};$$

$$A_2 = 2\pi \int_0^a Pw(r) dr;$$

$$E_1 = \frac{2\pi\epsilon\epsilon_0 U^2 a}{2} \int_0^a \frac{dr}{d-w(r)},$$

где d — расстояние между электродами; $w(r)$ — прогиб диафрагмы.

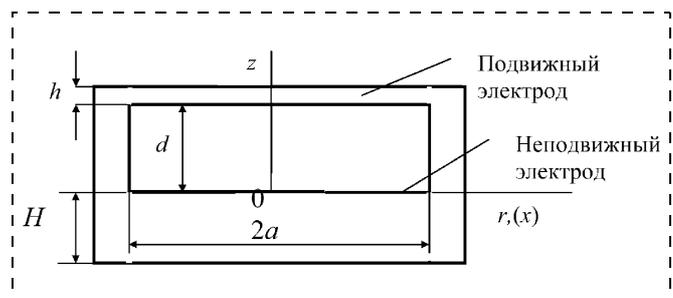


Рис. 1. Схематическое изображение системы из подвижного и неподвижного электродов

Энергия упругой деформации круглой диафрагмы при ее малых прогибах ($h \ll a$) [4, с. 384]

$$E_2 = 2\pi \frac{D}{2} \int_0^a \left[\left(\frac{\partial^2 w(r)}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial w(r)}{\partial r} \right)^2 - \frac{2(1-\nu)}{r} \frac{\partial w(r)}{\partial r} \frac{\partial^2 w(r)}{\partial r^2} \right] r dr;$$

$$D = \frac{h^3 E}{12(1-\nu^2)},$$

где E — модуль Юнга; ν — коэффициент Пуассона.

В соответствии с (1)

$$2\pi \int_0^a \left\{ \frac{D}{2} \left[\left(\frac{\partial^2 w(r)}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial w(r)}{\partial r} \right)^2 - \frac{2(1-\nu)}{r} \frac{\partial w(r)}{\partial r} \frac{\partial^2 w(r)}{\partial r^2} \right] - \frac{\varepsilon \varepsilon_0 U^2}{2(d-w(r))} - w(r)P \right\} r dr = 0. \quad (2)$$

Для того чтобы интеграл (2) был равен нулю, подинтегральное выражение должно удовлетворять уравнению Эйлера [7, с. 326], тогда

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left\{ r \frac{\partial}{\partial r} \left[\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial w(r)}{\partial r} \right) \right] \right\} - \frac{\varepsilon \varepsilon_0 U^2}{2D(d-w(r))^2} - \frac{P}{D} = 0, \quad (3)$$

и при $U = 0$ уравнение (3) совпадает с дифференциальным уравнением поперечно-нагруженной круглой диафрагмы [4, с. 69].

Уравнение (3) точно такое же, как и использованное в работах [1, 2] при расчетах прогибов круглых диафрагм при действии электрического поля и давления, однако при этом нет необходимости в предположении об однородности электрического поля между диафрагмой и неподвижным электродом, которое было сделано в указанных работах.

В безразмерных величинах

$$R = \frac{r}{a}; \quad z(R) = \frac{w(r)}{d}; \quad V = \frac{a^2 U}{d} \sqrt{\frac{\varepsilon \varepsilon_0}{2Dd}},$$

$$q = \frac{a^4 P}{Dd} \quad (4)$$

уравнение (3) имеет вид

$$\frac{1}{R} \frac{\partial}{\partial R} \left\{ R \frac{\partial}{\partial R} \left[\frac{1}{R} \frac{\partial}{\partial R} \left(R \frac{\partial z(R)}{\partial R} \right) \right] \right\} - \frac{V^2}{(1-z(R))^2} - q = 0. \quad (5)$$

Частным точным решением однородного уравнения (5) является выражение

$$z(R) = 1 + \sqrt[3]{\frac{81}{64} V^2 R^{4/3}}. \quad (6)$$

Хотя это решение не удовлетворяет граничным условиям для жестко заземленной диафрагмы, которые при выборе начала отсчета в центре нижней пластины (см. рис. 1) имеют вид [4]

$$z(1) = 0; \quad z'(1) = 0,$$

тем не менее, выражение (6) дает возможность судить о форме поверхности подвижного электрода при $V \neq 0$.

Общее точное решение уравнения (5) нам неизвестно, поэтому найдем приближенные решения этого уравнения несколькими методами [4, 7].

Использовать выражение (6) в качестве аппроксимирующей функции нам представляется нецелесообразным, так как производная этой функции при $r = 0$ равна бесконечности. Поэтому воспользуемся выражением

$$z(R) = z_0(1 - R^2)^2, \quad (7)$$

которое является точным решением уравнения (5) для равномерно нагруженной жестко заземленной круглой диафрагмы при $V = 0$ [4, с. 71].

1. Метод коллокации [7].

Подставив (7) в уравнение (5) при $R = 0,1$ получим уравнение для определения z_0 :

$$z_0 - \frac{1}{64} \frac{V^2}{(1 - 0,9801 z_0)^2} - \frac{q}{64} = 0. \quad (8)$$

При $V = 0$ $z_0 = q/64$, что соответствует точному решению для круглой диафрагмы при действии однородной поперечной нагрузки [4].

Из уравнения (8) следует, что

$$V = (1 - 0,9801 z_0) \sqrt{64 z_0 - q}, \quad (9)$$

и из (9) видно, что зависимость $V = f(z_0)$ имеет

экстремум, который наблюдается при $z_{0cr} = \frac{1}{2,9403} + \frac{q}{96}$. При этом

$$V_{cr} = \frac{1}{285,12} \sqrt{192 - 2,9403q(64 - 0,9801q)}.$$

2. Метод Галеркина.

В соответствии с [7]

$$\int_0^a z(R) \left\{ \frac{1}{R} \frac{\partial}{\partial R} \left\{ R \frac{\partial}{\partial R} \left[\frac{1}{R} \frac{\partial}{\partial R} \left(R \frac{\partial z(R)}{\partial R} \right) \right] \right\} - \frac{V^2}{(1-z(R))^2} - q \right\} dR = 0. \quad (10)$$

В результате решения (10) получим уравнение для определения z_0 :

$$2z_0^{3/2}(1-z_0)(64z_0-q) - 3(\sqrt{z_0} - (1-z_0)\operatorname{arctg}\sqrt{z_0})V^2 = 0, \quad (11)$$

которое совпадает с соответствующим уравнением, полученным в работах [1, 2].

Из (11) следует, что

$$V = \left(\frac{2z_0^{3/2}(1-z_0)(64z_0-q)}{3(\sqrt{z_0} - (1-z_0)\operatorname{arctg}\sqrt{z_0})} \right)^{1/2}. \quad (12)$$

Зависимость (12), так же как и (9), имеет экстремум, однако исследование этой функции на экстремум приводит к громоздкому трансцендентному уравнению относительно z_0 .

3. Решение уравнения (5) можно свести к решению *вариационной задачи* [4, 7]. Для этого уравнение (2) запишем в безразмерных величинах (4):

$$\int_0^1 \left\{ \left[\left(\frac{\partial^2 z(R)}{\partial R^2} + \frac{1}{R} \frac{\partial z(R)}{\partial R} \right)^2 - \frac{2(1-\nu)}{R} \frac{\partial z(R)}{\partial R} \frac{\partial^2 z(R)}{\partial R^2} \right] - \frac{V^2}{2(1-z(R))} - z(R)q \right\} R dR = 0. \quad (13)$$

Используя прямой метод [4, 7] и подставив выражение (7) в уравнение (13), получим

$$\frac{\partial}{\partial z_0} \int_0^1 \left\{ \left[\left(\frac{\partial^2 z(R)}{\partial R^2} + \frac{1}{R} \frac{\partial z(R)}{\partial R} \right)^2 - \frac{2(1-\nu)}{R} \frac{\partial z(R)}{\partial R} \frac{\partial^2 z(R)}{\partial R^2} \right] - \frac{2V^2}{(1-z(R))} - 2z(R)q \right\} R dR = 0.$$

В результате решения этого уравнения получается следующее выражение для V :

$$V = \left(\frac{2z_0^{3/2}(1-z_0)(64z_0-q)}{3(\sqrt{z_0} - (1-z_0)\operatorname{arctg}\sqrt{z_0})} \right)^{1/2}, \quad (14)$$

которое совпадает с (12).

На рис. 2 приведены зависимости относительного прогиба центра круглой диафрагмы от безразмерной разности потенциалов при трех значениях безразмерного давления, построенные по формулам (9) и (12), (14), и z_{0cr} , полученное по методу коллокации.

Из рис. 2 видно, что прогиб центра диафрагмы, равный z_0 , вычисленный по (9) и (12), (14), так же как z_{0cr} и V_{cr} , довольно заметно отличаются. Возможно, это отличие связано с простотой метода коллокации. При этом нужно заметить, что функция (7), использованная для аппроксимации прогибов круглых диафрагм при действии на

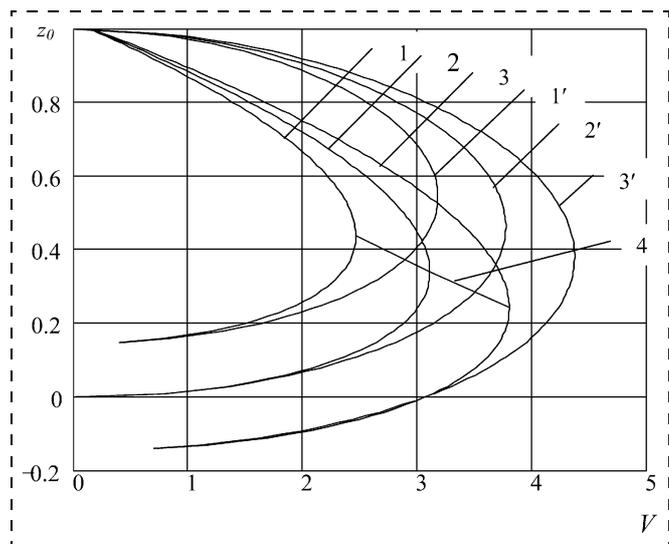


Рис. 2. Зависимости относительных прогибов центра круглой диафрагмы z_0 от безразмерной разности потенциалов V : расчет по (9): 1 — при $q = 9,375$; 2 — $q = 0$; 3 — $q = -9,375$; 4 — z_{0cr} ; расчет по (12) и (14): 1' — при $q = 9,375$; 2' — $q = 0$; 3' — $q = -9,375$

нее электрического поля и давления, существенно отличается от формулы (6), являющейся точным решением однородного уравнения (5).

Для прямоугольной диафрагмы шириной a и длиной b

$$A_1 = QU = U^2 \varepsilon \varepsilon_0 \int_{-a}^a \int_{-b}^b \frac{dydx}{d-w(x,y)};$$

$$A_2 = \int_{-a}^a \int_{-b}^b Pw(x,y) dydx,$$

где $w(x, y)$ — прогиб диафрагмы;

$$E_1 = \frac{\varepsilon \varepsilon_0 U^2}{2} \int_{-a}^a \int_{-b}^b \frac{dydx}{d-w(x,y)}.$$

Энергия упругой деформации прямоугольной диафрагмы при малых по сравнению с ее толщиной прогибах равна [4]

$$E_2 = \frac{D}{2} \int_{-a}^a \int_{-b}^b \left[\left(\frac{\partial^2 w(x,y)}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 w(x,y)}{\partial y^2} \right)^2 - 2(1-\nu) \left(\frac{\partial^2 w(x,y)}{\partial x^2} \frac{\partial^2 w(x,y)}{\partial y^2} - \left(\frac{\partial^2 w(x,y)}{\partial x \partial y} \right)^2 \right) \right] dydx.$$

На основании (1)

$$\int_{-a}^a \int_{-b}^b \left[\left(\frac{\partial^2 w(x,y)}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 w(x,y)}{\partial y^2} \right)^2 - 2(1-\nu) \left(\frac{\partial^2 w(x,y)}{\partial x^2} \frac{\partial^2 w(x,y)}{\partial y^2} - \left(\frac{\partial^2 w(x,y)}{\partial x \partial y} \right)^2 \right) - \frac{\varepsilon \varepsilon_0 U^2}{D(d-w(x,y))} - 2Pw(x,y) \right] dydx = 0. \quad (15)$$

Для того чтобы интеграл (15) был равен нулю, подынтегральное выражение должно удовлетворять уравнению Эйлера [7]. Тогда

$$\frac{\partial^4 w(x,y)}{\partial x^4} + \frac{\partial^4 w(x,y)}{\partial y^4} + 2 \frac{\partial^4 w(x,y)}{\partial x^2 \partial y^2} - \frac{\varepsilon \varepsilon_0 U^2}{2D(d-w(x,y))^2} - P = 0. \quad (16)$$

Уравнение (16) совпадает с уравнением, которое использовалось в работах [1, 2]. При этом, как и в случае с круглой диафрагмой, нет необходимости в предположении об однородности электрического поля между диафрагмой и неподвижным электродом.

Уравнение (16) удобно записать в безразмерных величинах:

$$X = \frac{x}{a}; \quad Y = \frac{y}{b}; \quad n = \frac{b}{a}; \quad z(X, Y) = \frac{w(x,y)}{d};$$

$$V = \frac{a^2 U}{d} \sqrt{\frac{\varepsilon \varepsilon_0}{2Dd}}; \quad q = \frac{a^4 P}{Dd}. \quad (17)$$

В результате

$$\frac{\partial^4 z(X, Y)}{\partial X^4} + \frac{1}{4} \frac{\partial^4 z(X, Y)}{\partial Y^4} + \frac{2}{n^2} \frac{\partial^4 z(X, Y)}{\partial X^2 \partial Y^2} - \frac{V^2}{(1-z(X, Y))^2} - q = 0, \quad (18)$$

и при $V = 0$ выражение (18) совпадает с дифференциальным уравнением, решение которого описывает прогибы прямоугольной диафрагмы при действии поперечной нагрузки [1].

Точное решение уравнения (18) нам не известно, а приближенные решения этого уравнения, как и для круглой диафрагмы, могут быть найдены несколькими методами [4, 7].

При выборе аппроксимирующей функции воспользуемся результатами работы [6], в которой рассмотрены прогибы жестко закрепленной по двум длинным сторонам длинной изотропной прямоугольной пластинки при совместном действии на нее поперечной нагрузки и электрического поля.

Тогда в *нулевом приближении* в качестве аппроксимирующей функции можно взять выражение

$$z = z_0 n^4 (1 - X^2)^2 (1 - Y^2)^2, \quad (19)$$

которое используется в качестве аппроксимирующей функции при решении задачи о прогибах прямоугольных диафрагм при действии на них однородной поперечной нагрузки [1, с. 120] и использовалось в работах [1, 2] в решении задачи о прогибах квадратной диафрагмы при совместном действии на нее электростатического притяжения

и поперечной нагрузки. При этом прогиб центра диафрагмы

$$w_0 = z_0 n^4.$$

В первом приближении аппроксимирующая функция, согласно работе [6], может быть взята в виде

$$z(X, Y) = z_0 \left(2C_1 \cosh(BX) + 2C_3 \cos(BX) - \frac{A}{B^4} \right) \left(2C_1 \cosh(BY) + 2C_3 \cos(BY) - \frac{A}{B^4} \right), \quad (20)$$

где $A = V^2 + q$; $B^4 = 2V^2$;

$$C_1 = \frac{A}{2B^4} \frac{\sin B}{\sin B \cosh B + \cos B \sinh B},$$

$$C_3 = \frac{A}{2B^4} \frac{\sinh B}{\sin B \cosh B + \cos B \sinh B}$$

и прогиб центра диафрагмы

$$w_0 = z_0 \left(2C_1 + 2C_3 - \frac{A}{B^4} \right) \left(2C_1 + 2C_3 - \frac{A}{B^4} \right).$$

1. Метод Галеркина.

Согласно [7]

$$\int_{-1}^1 \int_{-1}^1 z \left(\frac{\partial^4 z}{\partial X^4} + \frac{1}{n^4} \frac{\partial^4 z}{\partial Y^4} + \frac{2}{n^2} \frac{\partial^4 z}{\partial X^2 \partial Y^2} - \frac{V^2}{(1-z)^2} - q \right) dXdY = 0. \quad (21)$$

А. В качестве аппроксимирующей функции возьмем выражение (19).

После интегрирования уравнения (21) уравнение для определения z_0 имеет вид

$$z_0 \left(\frac{32 \ 768}{1575} (n^4 + 1) + \frac{131 \ 072}{11 \ 025} n^2 \right) = \left(V^2 \int_{-1}^1 \int_{-1}^1 \frac{(1-X^2)^2 (1-Y^2)^2 dXdY}{(1-z)^2} + \frac{256}{225} q \right). \quad (22)$$

Уравнение (22) относительно z_0 может быть решено численно или графически. В то же время зависимость $V = f(z_0)$ может быть получена в аналитическом виде:

$$V = \sqrt{\frac{z_0 \left(\frac{32 \ 768}{1575} (n^4 + 1) + \frac{131 \ 072}{11 \ 025} n^2 \right) + \frac{256}{225} q}{\int_{-1}^1 \int_{-1}^1 \frac{(1-X^2)^2 (1-Y^2)^2 dXdY}{(1-z)^2}}}. \quad (23)$$

При $V = 0$ $z_0 = \frac{49q}{128((n^4 + 1) + (2n)^2)}$, что хорошо согласуется с результатами, приведенными в работе [1] для прогибов прямоугольных диафрагм при действии на диафрагму только однородной поперечной нагрузки q .

Б. Использование в качестве аппроксимирующей функции (20) приводит к громоздким выражениям. Получающееся трансцендентное уравнение может быть решено численно или графически.

2. Решение уравнения (21), как и в случае с круглой диафрагмой, можно свести к решению вариационной задачи [4, 7]. Для этого запишем интеграл (15) через безразмерные величины (17). Тогда

$$\int_{-1}^1 \int_{-1}^1 \left[\left(\frac{\partial^2 z(X, Y)}{\partial X^2} + \frac{1}{n^2} \frac{\partial^2 z(X, Y)}{\partial Y^2} \right)^2 - 2 \frac{(1-\nu)}{n^2} \left(\frac{\partial^2 z(X, Y)}{\partial X^2} \frac{\partial^2 z(X, Y)}{\partial Y^2} - \left(\frac{\partial^2 z(X, Y)}{\partial X \partial Y} \right)^2 \right) - \frac{2V^2}{(1-z(X, Y))} - 2qz(X, Y) \right] dYdX = 0. \quad (24)$$

А. Аппроксимирующую функцию возьмем в виде (19) и, используя прямой метод [4, 7], подставив (19) в (24) и взяв производную от полученного выражения по z_0 , получим выражение, которое полностью совпадает с (22).

Б. В качестве аппроксимирующей возьмем функцию (20). Используя прямой метод, получим

$$\frac{\partial}{\partial z_0} \int_{-1}^1 \int_{-1}^1 \left[\left(\frac{\partial^2 z(X, Y)}{\partial X^2} + \frac{1}{n^2} \frac{\partial^2 z(X, Y)}{\partial Y^2} \right)^2 - 2 \frac{(1-\nu)}{n^2} \left(\frac{\partial^2 z(X, Y)}{\partial X^2} \frac{\partial^2 z(X, Y)}{\partial Y^2} - \left(\frac{\partial^2 z(X, Y)}{\partial X \partial Y} \right)^2 \right) - \frac{2V^2}{(1-z(X, Y))} - 2qz(X, Y) \right] dYdX = 0. \quad (25)$$

В результате интегрирования и дифференцирования получается довольно громоздкое выражение для каждого из слагаемых в выражении (25), поэтому вычисления z_0 удобнее проводить для каждого конкретного случая.

Зависимости относительных прогибов центров диафрагм w_0 от безразмерной разности потенциалов V для давлений $q = 9,375$, $q = 0$, $q = -9,375$

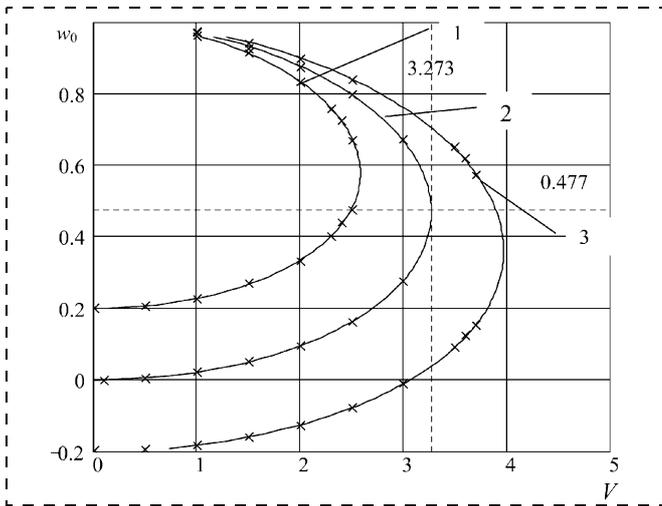


Рис. 3. Зависимости относительных прогибов центра квадратной диафрагмы w_0 от безразмерной разности потенциалов V :

1 — при $q = 9,375$; 2 — $q = 0$; 3 — $q = -9,375$.
Горизонтальная и вертикальная штриховые линии соответствуют w_{0cr} и V_{cr} из работ [1, 2]:
— — аппроксимирующая функция (19); × — аппроксимирующая функция (20)

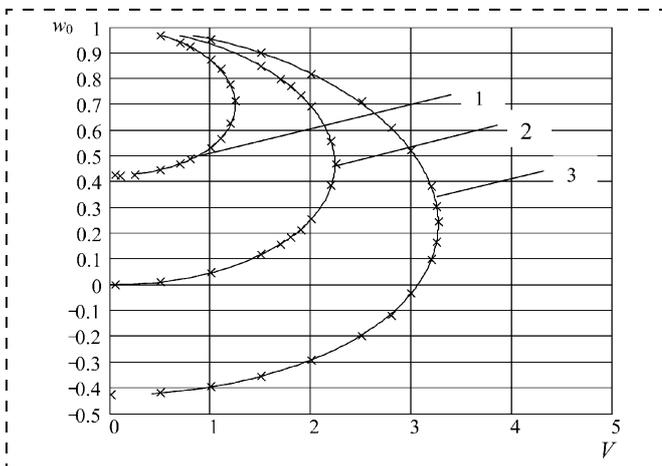


Рис. 4. Зависимости относительных прогибов центра прямоугольной диафрагмы w_0 ($n = 2$) от безразмерной разности потенциалов V :

1 — $q = 9,375$; 2 — $q = 0$; 3 — $q = -9,375$:
— — аппроксимирующая функция (19); × — аппроксимирующая функция (20)

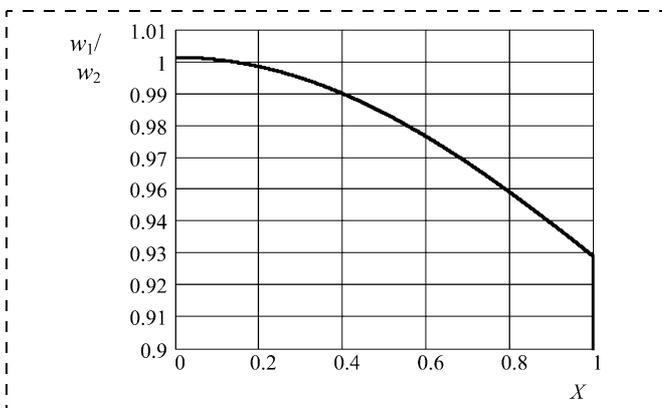


Рис. 5. Зависимости отношения прогибов квадратных диафрагм от координаты X ($Y = 0$) при $V = 3,003$:

w_1 — прогиб диафрагмы при аппроксимации функцией (19);
 w_2 — прогиб диафрагмы при аппроксимации функцией (20)

приведены на рис. 3 для квадратной диафрагмы и на рис. 4 для прямоугольной диафрагмы с отношением сторон 1:2. На рис. 3 точка пересечения горизонтальной и вертикальной штриховых линий соответствуют w_{0cr} и V_{cr} из работ [1, 2].

Из рис. 3 и 4 видно, что прогибы центров квадратной и прямоугольной с отношением сторон 1:2 диафрагм, вычисленные методом Галеркина и прямым методом, имеют близкие значения. Однако формы поверхностей изогнутых диафрагм при их аппроксимации функциями (19) и (20) отличаются между собой. На рис. 5 приведена зависимость отношения прогибов квадратной диафрагмы от координаты X ($Y = 0$) при $q = 0$ и $V = 3,003$. Из рисунка видно, что при аппроксимации прогибов функцией (20) прогибы у краев диафрагмы меньше, чем при аппроксимации прогибов функцией (19), что качественно согласуется с частным точным решением для длинной изотропной жестко заземленной пластинки при действии на нее электрического поля и однородной нагрузки [6].

Выводы

1. Получены дифференциальные уравнения, решения которых описывают прогибы круглой и квадратной диафрагм при совместном действии на них поперечной нагрузки и электрического поля.
2. Найдены приближенные решения полученных дифференциальных уравнений для жестко закрепленных круглой и прямоугольной диафрагм несколькими методами.
3. Относительные прогибы центров квадратной и прямоугольной (с отношением сторон 1:2) диафрагм, вычисленные двумя методами с использованием двух аппроксимирующих функций, имеют близкие значения, в то время как формы изогнутых поверхностей диафрагм для двух рассмотренных аппроксимирующих функций — разные.

Список литературы

1. Гридчин В. А., Драгунов В. П. Физика микросистем. Ч. 1. Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2004.
2. Драгунов В. П. Влияние формы упругого элемента на характеристики микромеханических систем // Микросистемная техника. 2004. № 1. С. 20—27.
3. Драгунов В. П. Нелинейная модель упругого элемента микромеханических систем // Микросистемная техника. 2004. № 6. С. 19—24.
4. Тимошенко С. П., Войновский-Кригер С. Пластинки и оболочки. М.: Физматгиз, 1963.
5. Nathanson H. C., Newell W. E., Wickstrom R. A., Davis J. R. The resonant gate transistor // IEEE Trans. On Electron Devices. 1967. № 14. P. 117—133.
6. Любимский В. М. Изгиб изотропной длинной прямоугольной пластинки под действием электростатического притяжения и поперечной нагрузки // Нано- и микросистемная техника. 2007. № 4. С. 41—44.
7. Корн Г., Корн Т. Справочник по математике для научных работников и инженеров. М.: Наука, 1970.

УДК 531.787.8

А. В. Ушков, А. Н. Козлов,
МГТУ им. Н. Э. Баумана, г. Москва

ПРОЕКТИРОВАНИЕ, ИЗГОТОВЛЕНИЕ И ИССЛЕДОВАНИЕ КРЕМНИЕВЫХ ЧУВСТВИТЕЛЬНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ ДАВЛЕНИЯ СО ВСТРОЕННОЙ ЗАЩИТОЙ ОТ ПЕРЕГРУЗОК

Разработан кремниевый чувствительный элемент датчика давления со встроенной защитой от перегрузок. Отработана технология изготовления таких чувствительных элементов. Экспериментально подтверждена возможность увеличения перегрузочной способности мембраны чувствительного элемента при введении в его конструкцию упора.

Введение

Датчики давления применяются в системах контроля и управления технологическими процессами для измерения давления жидких и газообразных сред. В качестве первичных преобразователей давления в электрический сигнал в датчиках широко используются кремниевые чувствительные элементы (ЧЭ) тензорезистивного типа [1]. Мембраны таких ЧЭ в зависимости от конструкции способны выдерживать 5...10-кратную перегрузку по давлению. Во время работы датчика возможны ситуации, когда перегрузка превышает номинальное давление в несколько сотен и даже тысяч раз. Перегрузка может быть вызвана пульсациями давления и гидроударами, ошибками персонала при регламентных работах. Для защиты мембраны чувствительного элемента от воздействия перегрузок в конструкцию датчика вводят компенсирующие узлы, которые при превышении определенного порога давления ограничивают ее дальнейшее перемещение, и тем самым предотвращают разрушение. Однако это приводит к усложнению конструкции и увеличению себестоимости прибора.

Объект исследования

Проведенные исследования [2] показывают, что если на расстоянии, равном или превышающем номинальный прогиб мембраны от ее исходного положения расположить упор, можно увеличить перегрузочную способность мембраны на несколько порядков. На базе полученных резуль-

татов спроектирован чувствительный элемент давления со встроенной защитой от перегрузок.

Кристаллы ЧЭ (рис. 1, см. третью сторону обложки) изготовлены по биполярной технологии без слоя разделительной диффузии. На кристалле методом ионной имплантации сформированы четыре тензорезистора, объединенные в мостовую схему. На периферии кристалла предусмотрен терморезистор, выполняющий функции датчика температуры для регулировки температурного изменения нулевого сигнала и чувствительности. Мембрана чувствительного элемента (рис. 1, а) имеет центральный выступ (жесткий центр) [3]. Для ее формирования использовалось анизотропное травление в водном растворе едкого кали.

Основания ЧЭ (рис. 1, б) выполнены из стекла марки ЛК-5 (ЛК-7). В области стеклянного основания, соответствующей положению жесткого центра (ЖЦ), выполнено стопорное углубление. Его глубина определяется значением прогиба мембраны при приложении к ней номинального давления. Рабочий ход мембраны при номинальном давлении составляет несколько микрометров. Поскольку при групповом методе изготовления чувствительных элементов всегда существует разброс номинальных размеров по толщине пластины, для исключения срабатывания защиты до достижения номинального давления зазор между поверхностями жесткого центра и стопорного углубления должен превышать номинальный прогиб мембраны. В исследуемых чувствительных элементах использовались основания с углублением 11...14 мкм. Для подвода давления к мембране в основании предусмотрено отверстие круглой формы, смещенное к периферии кристалла для исключения проваливания и заклинивания ЖЦ в нем. При подаче на мембрану давления, превышающего номинальное, поверхность жесткого центра упирается в поверхность пьедестала, что предотвращает дальнейшее перемещение и разрушение мембраны (рис. 2).

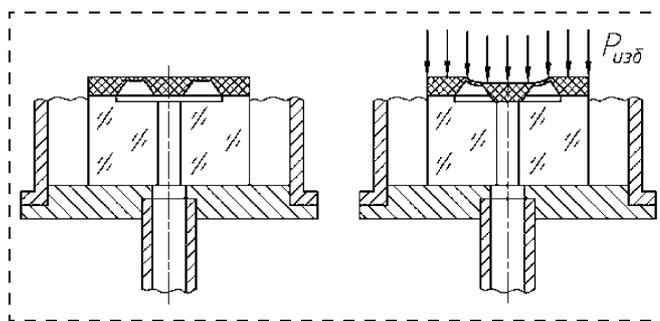


Рис. 2. Принцип работы упора

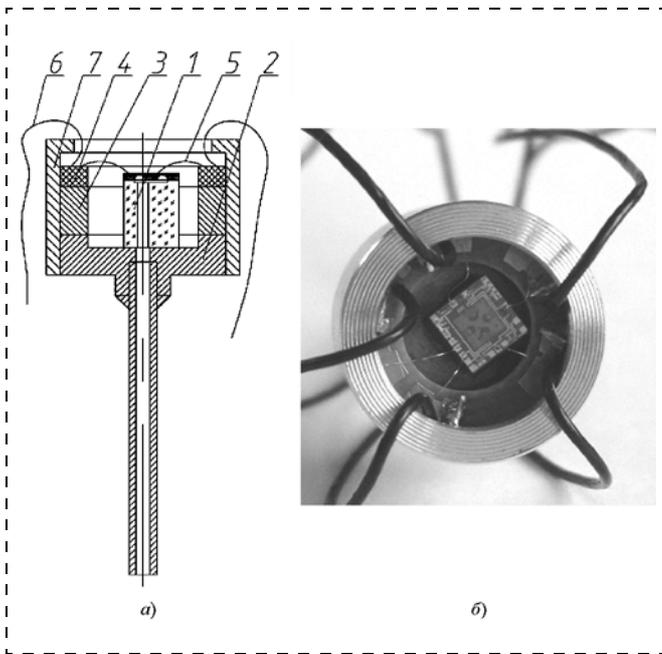


Рис. 3. Конструкция (а) и фотография (б) тензомодуля давления: 1 — чувствительный элемент; 2 — корпус тензомодуля; 3 — кольцо; 4 — плата; 5 — разварка контактов; 6 — провод для подключения тензомодуля к стенду; 7 — крышка

Присоединение кристаллов к основанию осуществлялось путем электростатического соединения (анодной посадки). Узел ЧЭ — стекло закреплялся в корпусе тензомодуля (рис. 3) с помощью клея.

Для формирования углубления в пьедесталах ЧЭ применялось жидкостное травление в буферном травителе и травление в плазме [4]. Процесс формирования углубления в основании указанными способами малопроизводителен вследствие достаточно маленькой скорости удаления материала, составляющей примерно 1,3...1,6 мкм/ч для жидкостного травления, и 6...6,5 мкм/ч для плазменного травления. Кроме того, для жидкостного травления необходима маска, позволяющая защитить поверхность стекла в течение всего времени травления. Первоначально в качестве маски для буферного травителя использовались пленки металлов. Однако при отработке режимов травления было выявлено, что такая маска не позволяет защитить поверхность стекла в течение столь длительного времени по причине ее стравливания и отслаивания. Решить проблему удалось подбором специального фоторезиста. При профилировании стекла в плазме маской служила напыленная на поверхность стекла металлическая пленка.

Методика проведения и результаты исследований

Испытания тензомодулей на базе чувствительных элементов с упором проводились в специальной камере, рассчитанной на предельное давле-

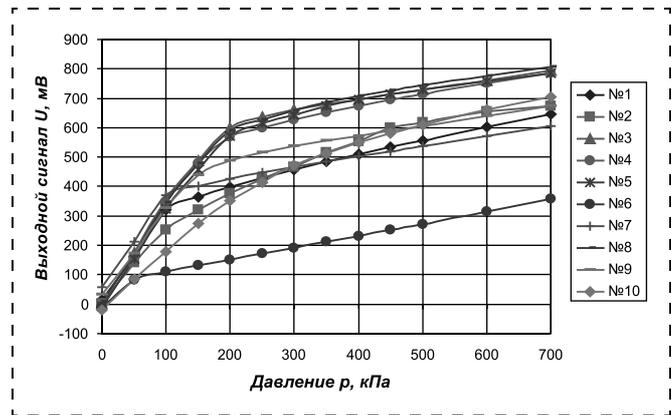


Рис. 4. Исследование перегрузочной способности кристаллов

ние 20 МПа. Тензомодули размещались в гнездах испытательной камеры, тензомост запитывался напряжением 5 В постоянного тока. Ввиду того, что при проведении эксперимента не было приборов, позволяющих дискретно задавать давление свыше 700 кПа, перегрузочная способность тензомодулей исследовалась в два этапа. На первом этапе давление в диапазоне 0...700 кПа подавалось на тензомодули от датчика давления "Воздух-6,3", на втором этапе — от баллона со сжатым воздухом. Преобразовательные характеристики тензомодулей в диапазоне 0...700 кПа приведены на рис. 4. При подаче перегрузки от баллона требуемый уровень давления фиксировался по манометру с верхним пределом измерения 10 МПа с ценой деления шкалы 0,1 МПа, при этом выходной сигнал с тензомодулей не снимался. Давление подавалось до разрушения одного из тензомодулей, затем оно сбрасывалось до атмосферного, с тензомодулей снимались показания начального выходного

Таблица 1

Расчет перегрузочной способности тензомодулей

Номер модуля	Давление, при котором произошло разрушение мембраны, МПа	Перегрузочная способность
1	1,0	40
2	4,45	178
3	2,0	80
4	3,05	122
5	3,2	128
6	3,05	122
7	4,45	178
8	2,3	92
9	2,3	92
10	1,65	66
Среднее значение	2,75	110

Расчет изменения начального выходного напряжения ЧЭ после перегрузки

Напряжение	Номер модуля									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
U_{0_1}	12,85	0,876	0,806	-13,121	-5,854	-9,233	6,401	8,194	12,062	-10,468
U_{0_2}	12,69	0,983	0,784	-12,783	-5,595	-9,661	6,924	8,141	12,168	-10,995
$\delta U_0, \%$	0,131	0,091	0,016	0,241	0,110	0,489	0,416	0,041	0,094	0,396

напряжения, подача давления возобновлялась. Данные о перегрузочной способности тензомодулей приведены в табл. 1.

Начальное выходное напряжение фиксировалось до подачи перегрузочного давления (U_{01}) и после сброса давления до атмосферного (U_{02}) с предварительной выдержкой тензомодулей в течение 10 мин. Изменение начального выходного напряжения δU_0 после подачи перегрузочного давления рассчитывалось по формуле

$$\delta U_0 = \frac{|U_{02} - U_{01}|}{dU_{\text{ном}}} 100.$$

Результаты представлены в табл. 2.

Исследование перегрузочной способности тензомодулей показывает, что разрушение мембраны при использовании упора происходит при давлении, в среднем в 110 раз превышающем номинальное. Изменение начального выходного напряжения при этом не превышает 0,5 %.

Как сказано выше, формирование углубления за счет стеклянного основания малопроизводительно и требует подбора маски, способной защитить поверхность стекла во время его микропрофилирования. Это ведет к увеличению трудоемкости и усложнению технологии изготовления ЧЭ. В качестве альтернативного варианта возможен перенос зазора из стеклянного основания в кремниевую пластину (рис. 5).

По результатам проведенной работы можно сделать вывод, что введение в конструкцию чувствительного элемента давления ограничителя прогиба мембраны может существенно увеличить ее перегрузочную способность. Исследования опытных образцов чувствительных элементов с упором

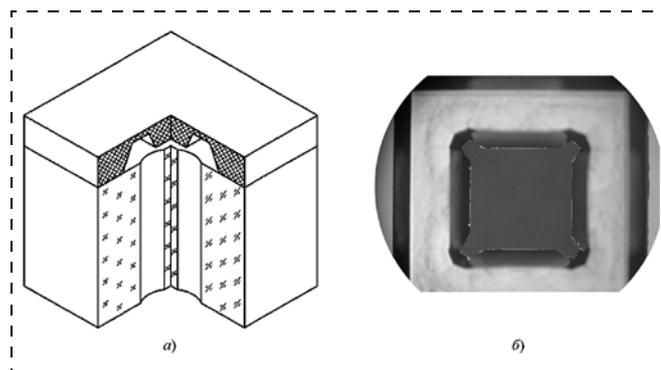


Рис. 5. Конструкция чувствительного элемента (а) и фотография фрагмента кристалла с жестким центром, в котором стопорное углубление выполнено за счет кремниевого чипа

показывают, что они остаются стойкими к перегрузкам, превышающим номинальное давление в 100 раз. Актуальность проделанной работы заключается в улучшении характеристик и снижении стоимости датчиков давления за счет упрощения их конструкции.

Список литературы

1. Ваганов В. И. Интегральные тензопреобразователи. М.: Энергоатомиздат, 1983.
2. Ушков А. В. Проектирование, изготовление и исследование тензомодулей датчиков давления на базе кремниевых чувствительных элементов // Вопросы атомной науки и техники. Серия Ядерное приборостроение. Вып. 1 (21). 2004.
3. Beeby S., Ensell G., Kraft M., White N. MEMS Mechanical Sensors. Artech House Inc., Boston — London. 2004.
4. Xinghua Li, Takashi Abe. Masayoshi Esashi Deep reactive ion etching of Pyrex glass using SF₆ plasma // Sensors and Actuators. 2001. A 87. 139—145.

Н. И. Мухуров, д-р. техн. наук,
Г. И. Ефремов, канд. техн. наук,
 Государственное научное учреждение
 "Институт электроники Национальной академии
 наук Беларуси"

АНАЛИЗ ВЗАИМОСВЯЗИ ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ЭЛЕКТРОСТАТИЧЕСКИХ ТОРСИОННЫХ МИКРОСИСТЕМ

Рассмотрено взаимодействие активных электростатических и реактивных механических силовых характеристик в процессе срабатывания микросистем торсионной конструкции для переключающих и сканирующих режимов.

Введение

Миниатюризация элементов управляющих комплексов привела к созданию и интенсивному расширению спектра электромеханических систем (МЭМС), базирующихся на электрических, электронных, механических микроструктурах, формируемых на основе прецизионной интегральной микроэлектронной технологии [1, 2]. В миниатюрных объемах МЭМС сочетаются высокие эксплуатационные и технико-экономические показатели, что по прогнозам [3] обеспечит прогрессирующий рост их производства.

Среди МЭМС существенное место занимают устройства, основанные на электростатическом принципе действия, которые в дополнение к присутствующим другим схемам достоинствам характеризуются мизерным потреблением электроэнергии. При этом их детали в максимальной степени сочетаются с требованиями планарной технологии. На этом принципе базируются многие конструкции, в частности, микрореле консольного [4], плоскопараллельного [5–7] и торсионного [8, 9] типов, акселерометры [10], колебательные микрогирометры [11], шаговые микродвигатели [12]. Однако теоретическая база (за исключением [12]) разработана в основном для решения частных отдельных задач рабочего цикла в применении к конструкции, размерам и возможностям технологии при реализации конкретного устройства. Так, в [8, 9] приведены расчеты рабочего напряжения разработанных вариантов электростатических микрореле.

В данной статье подробно рассматривается полный рабочий цикл торсионной схемы типа Push-Pull, перспективной в коммутационных устройствах электрических и оптических цепей, про-

водится теоретический анализ основных конструктивных и эксплуатационных параметров в относительном, обобщенном виде в целях выявления общих закономерностей ее функционирования, определяется диапазон рабочих характеристик.

Основные соотношения

Принятая схема (рис. 1) содержит неподвижные электроды 1, 2 на неподвижном диэлектрическом основании 3 и подвижные электроды 4, 5, расположенные на якоре 6, выполненном из диэлектрика и торсионно закрепленном на основании 3. В исходном положении электроды параллельны друг другу. По оси x внутренние края электродов находятся на одном расстоянии от начала координат, наружные края у подвижных электродов от начала координат расположены дальше, чем у неподвижных. При расчетах за основу взяты размеры неподвижных электродов, что освобождает от необходимости учета изменения активной части длины электродов при повороте якоря.

Электростатическая сила F между неподвижными и подвижными электродами в исходном положении определяется известной формулой

$$F = \frac{\epsilon_0 S U^2}{2t^2}, \quad (1)$$

где ϵ_0 — электрическая постоянная; S — площадь электродов; U — электрическое напряжение; t — межэлектродное расстояние.

При подаче на пары электродов соответствующих напряжений якорь повернется относительно оси 7 торсионов и межэлектродное расстояние станет переменным по длине электродов. Поскольку в торсионной системе, в отличие от консольной, сочетаются жесткий недеформирующийся якорь и упругие торсионы, изменение t по оси x происходит по линейному закону. В микрореле важно перемещение конца якоря V , в оптическом переключателе — угол поворота α (рис. 1). Так как максимальное значение α в существующих конструкциях не превышает $2^\circ = 0,0349$ рад, то можно принять отношение

$$\alpha/\alpha_{\max} = \text{tg}\alpha/\text{tg}\alpha_{\max} = V/t = k \quad (2)$$

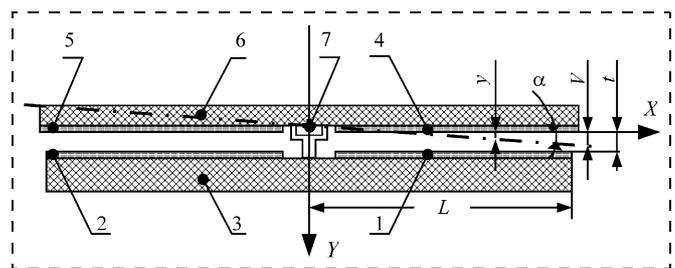


Рис. 1. Схема электростатической торсионной системы

с погрешностью менее 1 %, где k будем рассматривать как универсальный коэффициент, характеризующий и относительное смещение конца якоря, и относительный угол поворота подвижных электродов:

$$V = kt, \quad \alpha = k\alpha_{\max} = kt/L. \quad (3)$$

Разделив абсолютные значения размеров электродов по длине на L , получим их значения в относительном виде (рис. 2). Тогда на правой половине электродов, между которыми уменьшается межэлектродное расстояние, притягивающие электростатические силовые факторы будут определяться следующими соотношениями:

- единичная сила, действующая на i -й участок длиной Δx

$$F_{1i} = \frac{\varepsilon_0 a U^2 \Delta x}{2(t - y_x)^2} = \frac{\varepsilon_0 a U^2 L}{2t^2} \frac{1 - m_0}{n(1 - m_i k)^2}; \quad (4)$$

$$m_i = m_0 + (i - 0,5)(1 - m_0) \frac{1}{n}, \quad (5)$$

где a — ширина электрода; n — число участков; $i = 1, \dots, n$ — номер участка; $m_0 = L_0/L$; $m_i = x_i/L$; $\Delta m = \Delta x/L$;

- суммарная сила на электроде, полученная интегрированием (4),

$$F_1 = \frac{\varepsilon_0 a U^2 L}{2t^2} \frac{1 - m_0}{(1 - k)(1 - m_0 k)}; \quad (6)$$

- единичный момент на i -м участке

$$M_{1i} = \frac{\varepsilon_0 a U^2 x \Delta x}{2(t - y_x)^2} = \frac{\varepsilon_0 a U^2 L^2}{2t^2} \frac{m_i(1 - m_0)}{n(1 - m_i k)^2}; \quad (7)$$

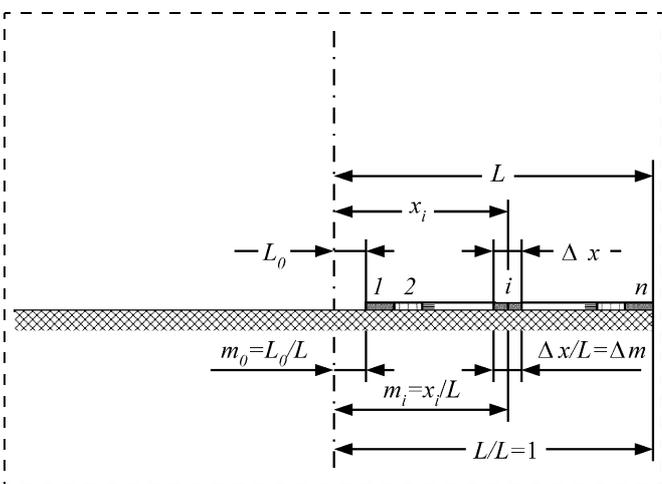


Рис. 2. Схема преобразования абсолютных размеров электродов по оси x в относительные величины

- суммарный момент на электроде, полученный интегрированием (7),

$$M_1 = \frac{\varepsilon_0 a U^2 L^2}{2t^2} \frac{1}{k^2} \left(\frac{1}{1 - k} - \frac{1}{1 - m_0 k} + \ln \frac{1 - k}{1 - m_0 k} \right). \quad (8)$$

Аналогично для отталкивающих электростатических силовых факторов на левой половине электродов, где межэлектродное расстояние увеличивается, получаем формулы

$$F_{2i} = \frac{\varepsilon_0 a U^2 L}{2t^2} \frac{1 - m_0}{n(1 + m_i k)^2}; \quad (9)$$

$$F_2 = \frac{\varepsilon_0 a U^2 L}{2t^2} \frac{1 - m_0}{(1 + k)(1 + m_0 k)}; \quad (10)$$

$$M_{2i} = \frac{\varepsilon_0 a U^2 L^2}{2t^2} \frac{m_i(1 - m_0)}{n(1 + m_i k)^2}; \quad (11)$$

$$M_2 = \frac{\varepsilon_0 a U^2 L^2}{2t^2} \frac{1}{k^2} \left(\frac{1}{1 + k} - \frac{1}{1 + m_0 k} + \ln \frac{1 + k}{1 + m_0 k} \right). \quad (12)$$

Общий момент, создаваемый электростатическими силами на обеих половинах якоря и обуславливающий скручивание торсионов,

$$M_F = \frac{\varepsilon_0 a U^2 L^2}{2t^2} \frac{1}{k^2} \left[2k^2 \frac{1 - m_0^2}{(1 - k^2)(1 - m_0^2 k^2)} + \ln \frac{1 - k^2}{1 - m_0^2 k^2} \right]. \quad (13)$$

Общий момент электростатических сил M_F должен преодолеть сопротивление двух торсионов, которыми якорь закреплен в основании. Их реактивный момент M_T определяется выражением

$$M_T = 2 \frac{GJ_T}{l_T} \alpha = 2 \frac{GJ_T t}{l_T L} k, \quad (14)$$

где G — модуль сдвига; J_T — момент инерции при скручении; l_T — длина торсиона.

Теоретическим условием, необходимым и достаточным для перемещения якоря во всем межэлектродном промежутке, является обеспечение равновесного состояния, выражаемого равенством

$$M_F = M_T. \quad (15)$$

Из (8), (12)—(15) следует, что напряжение, обеспечивающее поворот якоря при значениях k в диапазоне 0, ..., 1, составляет:

- при действии только сил притяжения

$$U_{\text{пр}} = \sqrt{\frac{4GJ_T t^3}{\varepsilon_0 a l_T L^3}} \sqrt{\frac{k^3}{\frac{1}{1-k} - \frac{1}{1-m_0 k} + \ln \frac{1-k}{1-m_0 k}}}; \quad (16)$$

- при действии только сил отталкивания

$$U_{\text{от}} = \sqrt{\frac{4GJ_T t^3}{\varepsilon_0 a l_T L^3}} \sqrt{\frac{k^3}{\frac{1}{1+k} - \frac{1}{1+m_0 k} + \ln \frac{1+k}{1+m_0 k}}}; \quad (17)$$

- при совместном действии сил притяжения и отталкивания в режиме Push-Pull

$$U = \sqrt{\frac{4GJ_T t^3}{\varepsilon_0 a l_T L^3}} \times \sqrt{\frac{k^3}{2k^2 \frac{1-m_0^2}{(1-k^2)(1-m_0^2 k^2)} + \ln \frac{1-k^2}{1-m_0^2 k^2}}}. \quad (18)$$

Производная напряжения U по пути перемещения якоря, позволяющая определить экстремальные параметры $U(k)$, получена в следующем виде:

$$\frac{dU}{dV} = \sqrt{\frac{4GJ_T}{\varepsilon_0 a l_T L^3}} V \times \frac{3-4k^2-k^4}{(1-k^2)^2} - \frac{3-4m_0^2 k^2-m_0^4 k^4}{(1-m_0^2 k^2)^2} + 1,5 \ln \frac{1-k^2}{1-m_0^2 k^2} \times \left[\frac{2k^2(1-m_0^2)}{(1-k^2)(1-m_0^2 k^2)} + \ln \frac{1-k^2}{1-m_0^2 k^2} \right]^{\frac{3}{2}}. \quad (19)$$

Особенностью и достоинством соотношений (16)—(19) является разделение конструктивных параметров системы (первый множитель) и коэффициентов, характеризующих относительное изменение параметров межэлектродного промежутка в процессе рабочего цикла (второй множитель).

Анализ базовых характеристик

Второй множитель в формуле (18) определяет кривую, которая отражает зависимость элект-

ромеханических факторов F, M_F, M_T, U, U' от *относительного* изменения межэлектродного расстояния и которая для каждого варианта у всех типовых размеров рассматриваемой схемы является единственной и поэтому правомочно назвать ее *базовой*. По этим кривым можно установить участки плавного и резкого изменения фактора, положения экстремальных точек и т. п. Ординаты базовой кривой являются исходными для расчета соответствующего параметра.

Первый множитель в формуле (18) за счет выбора значений входящих в него компонентов дает возможность реализовать в конкретных конструкциях требуемые эксплуатационные параметры в *абсолютных* значениях. Корректировка обеспечивается взаимной конструктивной независимостью компонентов, достаточно большим их числом и повышенными степенями t, L и d (сторона квадрата сечения торсиона). Этот первый множитель один для всех сил $A_1 = \varepsilon_0 a U^2 L / 2t^2$ и другой — для всех электростатических моментов $A_2 = \varepsilon_0 a U^2 L^2 / 2t^2$, которые позволяют сопоставлять силовые кривые между собой, так как один отличается от другого только умножением на L . В формулах напряжения (18), произведенной (19) и момента торсионов (13) он равен соответственно $A_3 = (4GJ_T t^3 / \varepsilon_0 a l_T L^3)^{-2}$, $A_4 = (4GJ_T V / \varepsilon_0 a l_T L^3)^{-2}$ и $A_5 = 2GJ_T t k / l_T L$.

Таким образом, расчет рассмотренных функций в зависимости от k выполняется по единой схеме:

$$Q(k) = A Q^*(k), \quad (20)$$

где Q — параметр; Q^* — безразмерная ордината соответствующей базовой кривой. При заданных значениях $Q(k)$ и $Q^*(k)$ определяется и корректируется значение любого входящего в A параметра.

Представим графически базовые зависимости Q^* рассматриваемых электромеханических факторов от k с учетом влияния m_0 и проведем их анализ. Примем минимальное значение m_0 равным 0,2, что обеспечит гальваническую развязку управляющих электродов, а максимальное значение $k = 0,95$, при котором исключаются математические неопределенности и электрические замыкания. На рисунках с правой стороны оси ординат расположим кривые, относящиеся к притягивающим электродам, с левой — к отталкивающим.

На рис. 3 представлено распределение единичных сил F_i^* в относительных безразмерных величинах по относительной длине неподвижного электрода в зависимости от величин k и $m = 0,2, \dots, 1,0$. Изменение сил F_i^* можно охарактеризовать следующим образом. В точках притягиваемых электродов, находящихся в зоне от $k = 0,6$ и $m = 1,0$ до $k = 0,95$ и $m = 0,6$, увеличение F_{1i}^* идет достаточно плавно, почти линейно, и резко

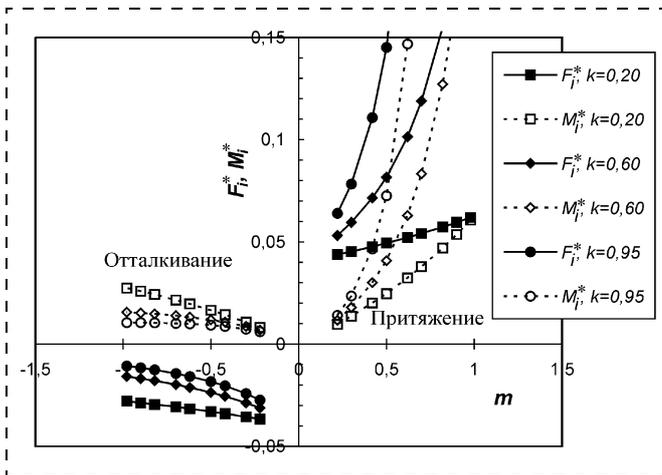


Рис. 3. Базовые кривые распределения единичных сил $F_i^*(k)$ и единичных моментов $M_i^*(k)$

за ее пределами. Относительные силы отталкивания F_{2i}^* другой паре электродов значительно меньше и с увеличением угла постепенно, тоже линейно, снижаются с 0,036 при $k = 0,2$ и $m = 0,2$ до 0,01 при $k = 0,95$ и $m = 1,0$, т. е. всего лишь на 0,026.

Аналогично, но несколько круче, происходит изменение единичных моментов M_{1i}^* (рис. 3), хотя можно было бы ожидать более резкое увеличение момента, поскольку силы F_1^* на конце электрода имеют не только большее значение, но и большее плечо. Моменты M_{2i}^* незначительны, но вблизи исходного положения, т. е. при $k \approx 0$ и при условии $m \approx 0$, имеют место соотношения $F_{1i}^* \approx F_{2i}^*$ и $M_{1i}^* = M_{2i}^*$.

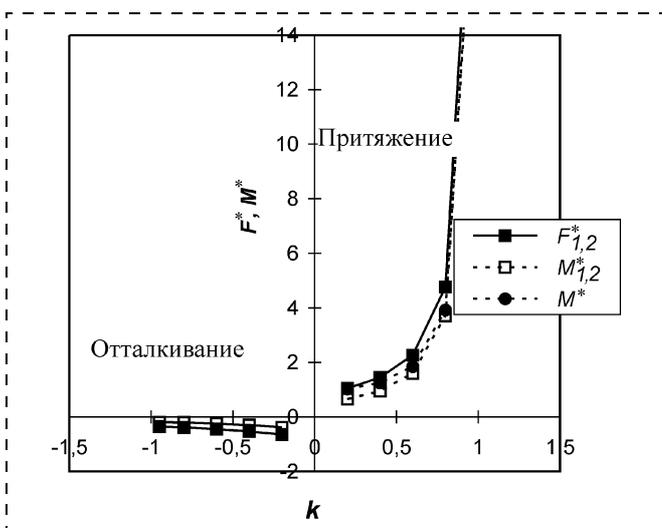


Рис. 4. Базовые кривые суммарных сил $F_{1,2}^*$, суммарных моментов $M_{1,2}^*$ и общего момента $M^*(k)$

Подобные единичным силам и моментам зависимости имеют суммарные силы $F_{1,2}^*$, моменты $M_{1,2}^*$ и общий момент M^* в функции k (рис. 4). Здесь важно отметить, что плавность характеристик F_1^* , M_1^* и M^* сохраняется до $k \sim 0,6$ и что на этом участке M_2^* довольно близко к M_1^* : доля M_2^* при $k = 0,2$ составляет $\sim 60\%$, при $k = 0,6$ — свыше 15% .

Электрическое напряжение, необходимое для постепенного поворота якоря в межэлектродном промежутке, определяется из условия равновесия электростатических и реактивных моментов (15) по соотношениям (16)—(18). Из рис. 5 следует, что это перемещение может быть выполнено как притягивающими электродами, так и отталкивающими, но в их воздействии есть существенные различия. Базовая зависимость $U_{от}^*$ от k носит практически линейный характер, так как абсолютное увеличение межэлектродного расстояния не сопровождается резким изменением его относительного значения. Следовательно, за счет отталкивающих электродов может быть получено управляемое перемещение якоря во всем межэлектродном промежутке, т. е. до $k = 0,95$, что требуется, например, в сканирующих оптических системах. Однако необходимое для этого электрическое напряжение в $\sim 3,3$ раза превышает максимальное напряжение между притягивающими электродами, что практически не всегда допустимо. Базовые зависимости $U_{пр}^*$ и U^* от k (рис. 5) имеют вид плавной кривой с нулевыми значениями при $k = 0$ и $k \approx 1$ и максимумом в средней части. Ранее подобные зависимости были получены

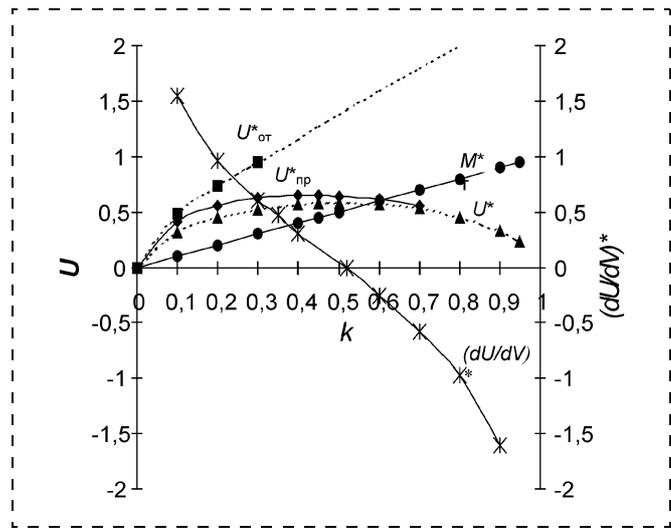


Рис. 5. Базовые кривые напряжений $U_{от}^*(k)$, $U_{пр}^*(k)$, $U^*(k)$, создаваемого ими момента $M_1^* = M_2^* = M_F^* = M_T^* = M^*$ и производной $(dU/dk)^*$

для электростатических реле плоскопараллельной конструкции с натянутым ленточным подвижным электродом в [12], с подвижным электродом на упругих держателях в [13], для консольных схем в [14].

Наличие максимума имеет большое значение для функционирования схемы. Оно свидетельствует о том, что после соответствующего максимуму значения $k = k_0$ рост электростатического момента при повышении напряжения (в связи с обратно пропорциональной квадратичной зависимостью $U(t)$ и малыми абсолютными значениями t) начинает опережать линейно нарастающий реактивный момент торсионов. Для продолжения управляемого перемещения якоря в режиме равновесного состояния напряжение должно начать снижаться.

Этой особенностью объясняется то, что в традиционных схемах, в которых управляющее напряжение при включении с большей или меньшей скоростью постоянно повышается, после достижения рабочего напряжения U_{\max} управляемое перемещение якоря прекращается и последний "мгновенно" преодолевает оставшееся межэлектродное расстояние при постоянном достигнутом напряжении. Такая особенность отмечена в расчетах [12, 14, 15] и экспериментальных конструкциях при различных значениях электрических напряжений от 130 В [9] до 3,5 В [10], но при этом процесс в целом не проанализирован и не описан в обобщенном виде.

Использование в расчетных соотношениях относительных величин дает следующие константы. Управляемое перемещение якоря притягивающими электродами осуществляется до $k_0 = 0,43$ при $U_{\text{прmax}}^* = 0,65$ и $m_0 = 0,2$.

Совместное действие обеих пар электродов согласно соотношению (18) снижает напряжение U_{\max}^* до 0,58 по сравнению с притягивающими электродами на ~10 %, и увеличивает координату максимума до $k_0 = 0,52$. Это результат отмеченной выше соизмеримости M_1^* и M_2^* в диапазоне $k = 0, \dots, 0,6$.

Определение рабочего напряжения конкретной разработанной конструкции с учетом максимального значения соответствующей базовой кривой сводится к расчетам по элементарным формулам (при $m_0 = 0,2$)

$$U_{\text{прmax}} = 0,65, \quad U_{\text{max}} = 0,584A_3, \quad (21)$$

а геометрических размеров при проектировании

$$\frac{J_T t^3}{a l_T L^3} = \frac{0,59 \varepsilon_0 U_{\text{прmax}}^2}{G}, \quad \frac{J_T t^3}{a l_T L^3} = \frac{0,74 \varepsilon_0 U_{\text{max}}^2}{G}. \quad (22)$$

Значения всех трех напряжений в функции k рассчитаны из условия сохранения равновесного

состояния, т. е. из условия деформирования одних и тех же двух торсионов во всем межэлектродном промежутке. Поэтому в итоге они обеспечивают получение единой зависимости $M_F(k)$, совпадающей с $M_T(k)$ (рис. 5) и формулируемой в следующем обобщенном виде:

$$M_T = A_5 M_k U_k^2, \quad (23)$$

где M_k и U_k — частные значения соответствующих кривых при $k = 0, \dots, 0,95$.

Величина k_0 , определяющая положение точки U_{\max} в режимах притяжения и суммарном, является постоянной для данной конструктивной схемы, не зависящей от изменения ее геометрических параметров. Последние могут влиять только на напряжение. Исключение составляет m_0 , входящее в переменную часть формул. Его увеличение сохранит прежнее распределение единичных сил F_i и моментов M_i на оставшейся части электродов (см. рис. 3), но уменьшит значения суммарных сил $F_{1,2}$ и моментов $M_{1,2}$. В результате повысятся напряжения равновесного цикла, но это позволит корректировать положение точки максимума: изменение m_0 от 0,20 до 0,75 в режиме притяжения уменьшает k_0 с 0,43 до 0,36, в суммарном режиме — с 0,51 до 0,44, напряжение при этом возрастает в ~1,35 раза (рис. 6).

В торсионных переключателях, замыкающих электрические цепи, знание k_0 и пути его уменьшения позволит устранить искрение контактов и пробой межэлектродного промежутка. В регулируемых устройствах величина k_0 , как будет показано ниже, существенно влияет на диапазон управляемого угла поворота якоря.

Определение диапазона рабочих параметров торсионно-симметричных актюаторов

Полученные математические соотношения и базовые кривые позволяют выполнить оценку диапазона рабочих напряжений и углов поворота якоря с электродами с учетом реально возможных

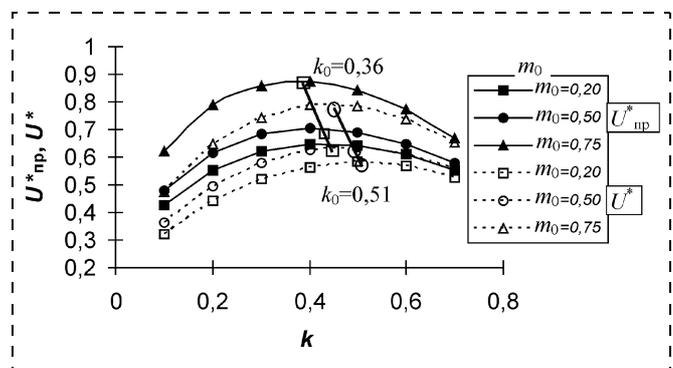


Рис. 6. Влияние m_0 на значение и положение $U_{\text{прmax}}^*$ и U_{max}^*

конструктивных значений элементов торсионных систем.

В множителе A_3 соотношения (18) содержатся размеры элементов двух компонентов торсионной системы различного функционального назначения: электродной части (t, L, a), создающей активные электростатические моменты, и торсионного узла (J_T, l_T), определяющего возникновение реактивных механических моментов. Соотношение их размеров задает рабочие параметры систем, но конструктивно их изменение не зависит друг от друга.

Рассмотрим предельное значение размеров элементов обоих компонентов.

По литературным данным [9] наибольший размер зеркала составляет 23 мм. Значит, можно принять $L_{\max} = 10$ мм; $a_{\max} = 8$ мм. Минимальное значение межэлектродного расстояния составляет $t_{\min} = 3$ мкм, т. е. $\alpha_{\max, \min} = t_{\min}/L_{\max} \approx 0,0003$ рад. Здесь следует отметить важное обстоятельство, заключающееся в том, что в отношении t/L для множителя A_3 оба параметра находятся в одной степени. Значит, при пропорциональном изменении их размеров и угол наклона α , и электрическое напряжение U (при прочих равных условиях) остаются постоянными. Изменение соотношения позволяет варьировать значениями обоих параметров. Доминирующее влияние при этом принадлежит межэлектродному расстоянию. Уменьшение t снижает напряжение, значение t_{\min} ограничивается возможностями технологии. Увеличение t сопровождается возрастанием α_{\max} , но повышает напряжение, которое ограничивается техническими требованиями и которое, учитывая широкий диапазон возможного использования торсионных систем, примем равным 220 В.

Компромиссной формой сечения торсионов, учитывающей технологические возможности и конструктивные требования, является квадратная, момент инерции при кручении составляет $J_T = 0,1406 a_T^4$. Исходя из этих же условий ограничиваем размеры a_T и l_T следующим диапазоном: $a_{T \min} = 0,075$ мм; $a_{T \max} = 0,10$ мм; $l_{T \min} = 0,25$ мм, $l_{T \max} = 0,50$ мм, а в расчетах используем их минимальное w_{\min} и максимальное w_{\max} отношения, чтобы оценить влияние жесткости торсионов на рабочие параметры системы.

Постоянные величины в (18), (22) равны: $\varepsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12}$ Ф/м; $G = 0,56$ Н/м²; $U_0 = 0,58$; $k_0 = 0,51$. Все геометрические размеры при расчетах выражаем в метрах, углы в радианах (в тексте и на рисунках для лучшего восприятия — в минутах).

Расчетные кривые $U_{\max}(t/L = \alpha_{\max})$ при различных значениях ширины a в диапазоне $(0,2...8,0) \cdot 10^{-3}$ м, предельных значениях соотношений жесткости торсионов, $m_0 = 0,2$ представлены на рис. 7.

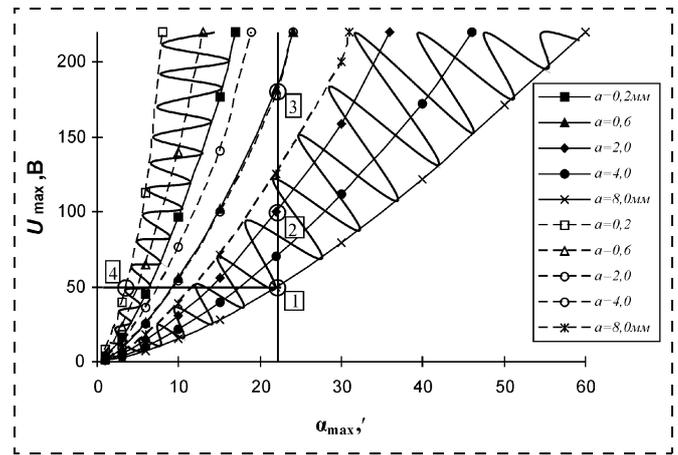


Рис. 7. Расчетный диапазон рабочих напряжений U_{\max} и угла поворота α'_{\max}

Как следует из расчетов, диапазон рабочих параметров в условиях равновесного режима весьма велик (рис. 7): от $U_{\max} = 3,2$ В, $\alpha_{\max} = 1'$ и $U_{\max} = 220$ В, $\alpha_{\max} = 9,3'$ при $a = 0,2 \cdot 10^{-3}$ м и w_{\max} до $U_{\max} = 2,0$ В, $\alpha_{\max} = 4,5'$ и $U_{\max} = 220$ В, $\alpha_{\max} = 60'$ при $a = 8 \cdot 10^{-3}$ м и w_{\min} . Ширина электродов оказывает эффективное влияние на рабочие параметры до $a = (3...4) \cdot 10^{-3}$ м: так, увеличение a с $0,6 \cdot 10^{-3}$ м до $4,0 \cdot 10^{-3}$ м при $22'$ снижает U_{\max} с 182 В до 70,5 В, а при $U_{\max} = 50$ В увеличивает угол с $9,6'$ до $17,1'$, тогда как дальнейшее увеличение a до $8 \cdot 10^{-3}$ м уменьшает U_{\max} лишь на 19,5 В и увеличивает угол на $4,9'$. За счет жесткости торсионов можно изменять рабочее напряжение в $\sim 2,5$ раза, угол в $\sim 2,0$ раза.

Отметим, что и в этих расчетах любую из кривых $U(k)$ благодаря принятой методике использования относительных величин можно принять в качестве исходной и определять непосредственно по ней рабочие параметры при других размерах конструктивных элементов по соотношениям:

- при постоянном U_{\max}

$$a_x = a_3 \sqrt{\frac{a_x}{a}} p; \quad (24)$$

- при постоянном угле α

$$U_x = U \sqrt{\frac{a}{a_x p}}, \quad (25)$$

где p — отношение жесткостей торсионов.

Таким образом, учитывая возможность независимого выбора размеров каждого элемента, можно считать, что у торсионных систем в режиме равновесного состояния теоретически имеются достаточные предпосылки для получения уст-

ройств с требуемыми эксплуатационными характеристиками и массогабаритными показателями. При этом нужно иметь в виду, что значение α_{\max} должно быть удвоено в связи с симметричностью конструкции.

Практически разработка торсионных систем для сканирующих оптических устройств осложняется рядом обстоятельств, основными из которых являются:

- отсутствие надежных прецизионных электронных схем, обеспечивающих использование нисходящей ветви кривой $U(k)$, что, как показали расчеты, сокращает более чем вдвое угол управляемого поворота;
- значительные отклонения устанавливаемого угла от расчетного в зоне плавного перехода от восходящей ветви к нисходящей, обусловленные увеличением погрешностей подаваемого электрического напряжения.

Проведем оценку переходной зоны с использованием базовых кривых и действительных значений конструктивных параметров торсионных систем.

В общем случае переходная зона ограничивается допустимым значением производной dU/dV , определяемой формулой (19). Поскольку $V = kt$, производная, в отличие от напряжения U (18), содержит t и L в разных степенях, что дает возможность проводить корректировку производной при постоянном напряжении за счет варьирования величин t и L даже при постоянном значении их отношения. Базовая кривая производной $(dU/dV)^*$ представлена на рис. 5. Оценим диапазон переходной зоны в зависимости от допустимой погрешности, выражаемой производной dU/dV , значения которой примем равными 1,25; 2,5; 5,0 В/мкм. В качестве примера рассмотрим точки № 1–4 семейства кривых, представленных на рис. 7. Пара-

метры точек с вариантами $a, б, в$ величин t и L приведены в таблице. Критериями выбора точек приняты: жесткость торсионов w_{\min} , равенство α_{\max} у точек № 1–3, равенство напряжения U_{\max} у точек № 1, 4. На рис. 8 представлены результаты расчета напряжения и производной, полученные по соотношениям (18) и (19) соответственно.

Анализ кривых на рис. 8 показывает, что:

- при $\alpha_{\max} = 22'$ переходная зона Δk уменьшается с $0,9k$ при $U_{\max} = 50$ В, $dU/dV = 5$ В/мкм, $a = 8$ мм, $t = 0,04$ мм (точка № 1, вариант a) до $0,4k$ при $U_{\max} = 182$ В, $dU/dV = 5$ В/мкм, $a = 0,6$ мм, $t = 0,04$ мм (точка № 3, вариант a) и до $\Delta k = 0,1k$ при $U_{\max} = 182$ В, $dU/dV = 1,25$ В/мкм, $a = 0,6$ мм, $t = 0,01$ мм (точка № 3, вариант $в$);
- при $U_{\max} = 50$ В величина Δk , равная $0,9k$ при $\alpha_{\max} = 22'$, $dU/dV = 5$ В/мкм, $a = 8$ мм, $t = 0,04$ мм (точка № 1, вариант a) снижается до $\Delta k = 0,4k$ при $\alpha_{\max} = 6,7'$, $dU/dV = 1,25$ В/мкм, $a = 0,2$ мм, $t = 0,005$ мм (точка № 4, вариант $в$).

Уменьшение жесткости торсионов с w_{\max} до w_{\min} при прочих равных условиях снижает Δk при рабочих напряжениях 50 В и 182 В до $0,1k$ и $0,03k$ соответственно.

Из рис. 8 и расчетов следует, что:

- переходная зона при заданных dU/dV и w может быть сокращена при $\alpha_{\max} = \text{const}$ за счет повышения напряжения U_{\max} , при $U_{\max} = \text{const}$ — за счет уменьшения межэлектродного расстояния t ;
- переходная зона может быть значительной, и она должна учитываться в расчетах управляемого рабочего угла поворота α_0 .

В итоге следует отметить, что при сравнительно большом относительном увеличении α_{\max} в

№ точки	Вариант	Параметр					
		a_T , мм	l_T , мм	a , мм	t , мм/L, мм	α_{\max} , мин	U_{\max} , В
1	a	0,075	0,500	8,0	0,04/6,25	22,0	50
	$б$				0,02/3,12		
	$в$				0,01/1,56		
2	a	0,075	0,500	2,0	То же	22,0	100
	$б$				То же		
	$в$				То же		
3	a	0,075	0,500	0,6	То же	22,0	182
	$б$				То же		
	$в$				То же		
4	a	0,075	0,500	0,2	0,02/10	6,7	50
	$б$				0,01/5		
	$в$				0,005/2,5		

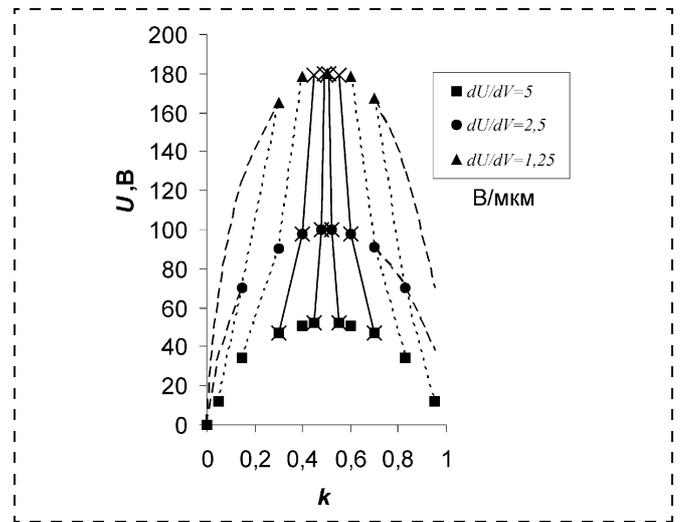


Рис. 8. Влияние производной dU/dk на переходные зоны напряжений $U(k)$ в точках 1, 2, 3, 4 из рис. 7

рассмотренном диапазоне углов его абсолютное реальное значение остается незначительным. Увеличение α_0 продолжает оставаться актуальной задачей. В [15] предложено увеличить диапазон управляемого перемещения якоря плоскопараллельных систем путем введения дополнительной последовательной емкости. Однако расширение его до $k = 1$ требует порядка пятикратного увеличения U_{\max} . В некоторых отдельных случаях в качестве привода может быть использован рассмотренный в данной статье отталкивающий момент. Более эффективного результата, вероятно, можно добиться путем изменения геометрических или силовых характеристик конструктивных элементов, направленного на повышение сопротивления управляемому напряжению после поворота якоря на угол α_0 . В СВЧ схемах ниспадающий участок может быть реализован при соизмеримости скорости изменения напряжения и инерционного движения якоря.

Заключение

Проведенный анализ позволил выявить принципиальные качественные и количественные закономерности, общие для срабатывания всех типоразмеров торсионных электростатических систем. Полученные соотношения могут быть использованы в качестве исходных данных при разработке подобных устройств.

Список литературы

1. Иванов А. А., Мальцев П. П., Телец В. А. О направлениях развития микросистемной техники // Нано- и микросистемная техника. 2006. № 1. С. 2—12.

2. Мухуров Н. И. Алюмооксидные микро-наноструктуры для микроэлектромеханических систем. Мн.: УП "Бест-принт". 2004. 166 с.
3. Wicht H. and Bouchaud J. NEXUS Market Analysis for MEMS and Microsystems III, 2005—2009 // MST News. 2005. № 5. P. 33—34.
4. Patent FRG № 4302204 H01H 59/00. 1993.
5. Патент РФ № 2667 H01H 59/00. 1998.
6. Patent FRG № 4305033 H01H 59/00. 1993.
7. Chan E. K., Kan E. C., Pinsky P. M. et al. Nonlinear dynamic modeling of micromachined microwave switches // Digest IEEE MTT-S Intern. Microwave Symp. Denver, CO, 1997. P. 1511—1514.
8. Hah D., Yoon T., Hong S. A low-voltage actuated micromachined microwave switch using torsion springs and leverage // MTT. 2000. Vol. 48. № 12. P. 2540—2543.
9. Graeffe J., Suhonen M., Sipola H. et al. Scanning Micromechanical mirror for finepointing units of intersatellite optical links // SPIE P. 2000. Vol. 4019. P. 372—378.
10. Панкратов О. В., Погалов А. И., Шелепин Н. А. Кремниевые пьезорезистивные акселерометры // Сборник материалов XIV НТК "Датчики и преобразователи информационных систем измерения, контроля и управления". М.: МГИЭМ. 2002. С. 160—161.
11. Погалов А. И., Тимошенко В. П., Тимошенко С. П. и др. Разработка микрогироскопов на основе многослойных структур кремния и стекла // Микросистемная техника. 1999. № 1. С. 36—41.
12. Дятлов В. Л., Коляшкин В. В., Потапов Б. С. и др. // Пленочная электромеханика. Новосибирск: Наука. 1991. 248 с.
13. Efremov G. I., Mukhurov N. I. Volumetric electrostatic microrelays—static electricity sensors based on anodic alumina // Proc. 3rd Intern. Conf. on Space Charge in Solid Dielectric. Paris. 1998. P. 499—502.
14. Efremov G. I., Mukhurov N. I., and Galdetsky A. V. Analysis of electromechanical parameters of electrostatic microrelay with a movable elastic cantilever electrode // SPIE P. 2000. Vol. 4019. P. 581—586.
15. Chan E. K., Dutton R. W. Electrostatic Micromechanical actuator with extended range of travel // J. Microelectromechanical System. 2000. Vol. 8. № 3. P. 321—328.

УДК 621.3.049

Е. С. Горнев, д-р техн. наук,
А. В. Дайнеко,
Н. А. Зайцев, д-р техн. наук, проф.,
Ю. М. Пастухова,
ОАО "Элпа", г. Москва

ИССЛЕДОВАНИЕ И РАЗРАБОТКА МИКРОВАКУУМНОГО ТРИОДА НА ОСНОВЕ ПОЛЕВОЙ ЭМИССИИ

Разработан микровакуумный триод с холодным катодом на основе эффекта полевой эмиссии. Представлены математическая модель и технологический маршрут изготовления устройства.

В настоящее время разрабатывается новая элементная база на основе приборов с полевой эмиссией. Эти приборы имеют сверхвысокое бы-

стродействие (субпикосекундное), высокую устойчивость к радиации, слабую чувствительность к температуре и весьма большие коэффициенты полезного действия [1]. Они могут быть использованы как усилители и генераторы миллиметрового диапазона волн в системах телевизионного вещания, радиолокационных станциях, телефонных системах сотовой связи и также применяться в мощных сильноточных устройствах, в микроэлектронных устройствах и чувствительных индикаторах изменения напряжения. Перспективным представляется разработка элементов памяти и плоских панельных дисплеев, обеспечивающих изображение высокого качества и высокой яркости (в том числе и для цветного телевидения). На их основе также проектируются электронно-лучевые приборы и рентгеновские трубки, т. е. те приборы, для которых

особое значение имеют малые размеры катода и большая плотность тока эмиссии.

Микровакуумные приборы также находят широкое применение в медицинских системах, но в настоящее время больше всего применяются в военной технике ввиду высокой радиационной и температурной стойкости. На их основе изготавливаются вакуумные усилители для радаров, приборов для систем связи, и других приборов, требующих высокой мощности, частоты и большой эффективности.

Весьма перспективно использование вакуумных триодов с холодным катодом. Преимущества холодных катодов состоят в том, что они обеспечивают изготовление приборов с высоким быстродействием, а также радиационной стойкостью.

Для получения тока полевой эмиссии с поверхности катода требуется создать напряженность поля около $(3-5)10^7$ В/см. В этом случае необходимо увеличение разности потенциалов между электродами, но такие значительные поля невозможно создать ввиду электрического пробоя даже в очень высоком вакууме. Очевидно, что большие напряженности поля достигаются не только увеличением разности потенциалов между катодом и анодом, но в большей степени, уменьшением расстояния между электродами. В результате этого электрическое поле у поверхности катода оказывается неоднородным: у микроскопических выступов оно несколько сильнее, во впадинах — слабее. Сильная зависимость работы выхода электронов от напряженности поля приводит к тому, что эмиссионная способность катода определяется фактически небольшими участками выступов. Именно поэтому полевая эмиссия реализуется на катодах в форме острия или лезвия.

Следовательно, для решения задачи по снижению управляющего напряжения триода необходимо использовать катоды с поверхностью, содержащей множество микроскопических выступов, на которых концентрируется высокая напряженность поля.

Для реализации этой идеи были исследованы различные формы катодов (рис. 1).

Был проведен сравнительный анализ форм эмиттеров, в результате которого установлено, что для наибольшего усиления поля необходим эмиттер, имеющий наибольшее аспектное отношение,

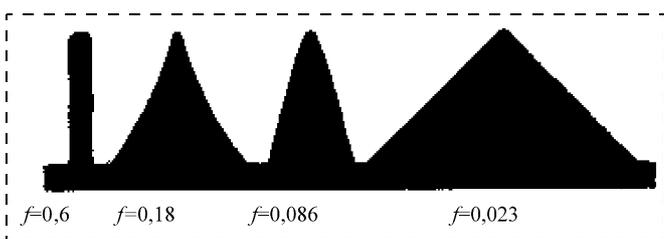


Рис. 1. Различные формы эмиттеров (f — аспектное отношение)

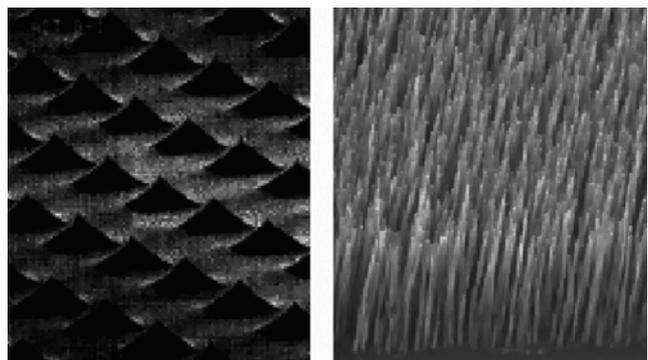


Рис. 2. Формы эмиттеров:

a — в виде острия; b — в виде УНТ

т. е. отношение радиуса катода к его высоте [2]. Наибольшие аспектные отношения имеют углеродные нанотрубки (УНТ) и острия (рис. 2).

Применение УНТ в качестве эмиттеров холодных катодов обусловлено не только их высоким аспектным отношением, благодаря которому напряженность электрического поля в окрестности вершины УНТ в сотни раз превышает соответствующую среднюю по объему напряженность электрического поля, создаваемого внешним источником, но и их хорошей электропроводностью. Указанные особенности УНТ приводят к аномально высокому значению тока холодной эмиссии при сравнительно низком напряжении, приложенном к УНТ [4].

После проведения ряда исследований [1] было доказано, что УНТ имеют высокую теплопроводность, почти вдвое превышающую теплопроводность алмаза. Оценочно они могут пропускать 10^9 А/см². Медный провод выходит из строя при 10^6 А/см² из-за того, что электрический нагрев приводит к плавлению провода. Высокая теплопроводность УНТ позволяет без труда пропускать по ним большие токи без существенного нагрева.

При приложении небольшого электрического поля вдоль оси нанотрубки происходит очень интенсивная эмиссия электронов [1]. Одно из применений этого эффекта состоит в усовершенствовании плоских панельных дисплеев, а также в использовании эффекта полевой эмиссии в осветительных вакуумных лампах с яркостью, как и у обычных ламп накаливания, но с более низкой мощностью потребления и более долговечных [1]. Другие исследователи используют эффект при разработке новых способов микроволнового излучения [1].

Существуют несколько способов получения углеродных нанотрубок:

- лазерное испарение;
- углеродной дугой;
- химическое осаждение паров.

Метод химического осаждения из паровой фазы (рис. 3, а) позволяет получать продукт непрерывно и возможно является наиболее предпочтительным для промышленного производства. Он заключается в разложении газообразного углеводорода, например метана (CH_4), при температуре 1100°C . При разложении газа образуются свободные атомы углерода, конденсирующиеся затем на более холодной подложке, которая может содержать разнообразные катализаторы, такие как железо, никель.

Существует другой метод, протекающий при более низких температурах (ниже 700°C). Метод плазмохимического осаждения из газовой фазы (рис. 3, б) основан на том, что газообразный источник углерода (чаще всего метан, ацетилен или моноксид углерода) подвергают воздействию плазмы для того, чтобы расщепить молекулу на реакционно-активный атомарный углерод. Далее происходит его распыление над разогретой подложкой, покрытой катализатором (рис. 4), на который осаждается углерод.

Меняя условия эксперимента можно менять диаметр трубок от 20 до 400 нм и их длину в пределах 0,1...50 мкм, так как параметры УНТ зависят от толщины пленки катализационного металла. Было выявлено, что самые лучшие свойства полевой эмиссии получают с нанотрубок, выращенных на никелевой пленке толщиной 4–5 нм [3]. В этом случае получаемые УНТ прямые и их оси направлены строго перпендикулярно подложке (см. рис. 4). Наблюдаемая плотность НТ по данным растровой электронной микроскопии составляет 10^7 мм^{-2} .

В результате проведенных исследований была определена конструкция устройства (рис. 5) и технологический маршрут его изготовления.

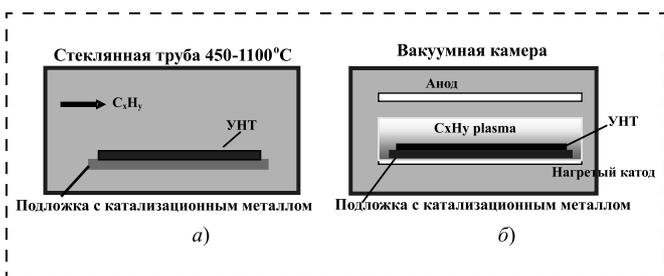


Рис. 3. Методы изготовления катодов с УНТ:

а — метод химического осаждения из паров; б — метод плазмохимического осаждения из газовой фазы

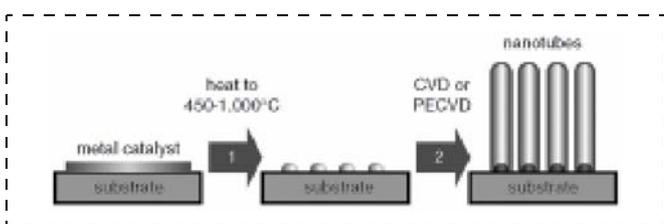


Рис. 4. Рост УНТ с применением катализационного металла

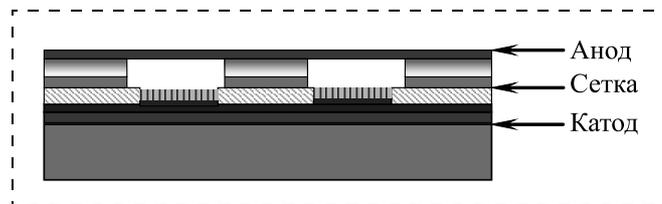


Рис. 5. Конструкция микровакуумного триода

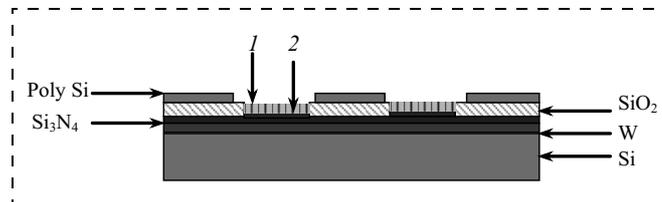


Рис. 6. Структура холодного катода:

1 — УНТ; 2 — катализационный металл

Технологический маршрут изготовления микротриода

Основные операции изготовления холодного катода с углеродными нанотрубками (рис. 6):

- 1) осаждение вольфрама на кремниевую пластину;
- 2) осаждение нитрида кремния;
- 3) осаждение пленки оксида кремния;
- 4) осаждение слоя polySi;
- 5) нанесение фоторезистной маски методом фотолитографии;
- 6) травление до слоя нитрида кремния;
- 7) напыление слоя катализационного металла;
- 8) осаждение УНТ.

В качестве анода используется пленка алюминия.

Для определения и оптимизации конструкции был проведен расчет плотности тока эмиссии, тока анода разрабатываемого устройства и выявлены факторы, влияющие на работу триода.

Расчет плотности тока эмиссии проводился по формуле Фаулера—Нордгейма:

$$j = A \frac{E^2}{\phi} \exp \left[-\frac{B\phi^{3/2}}{E} \right] \text{ [A/м}^2\text{]}, \quad (1)$$

где $A = 1,54 \cdot 10^{-10}$; $B = 6,73 \cdot 10^9$; E — напряженность поля; ϕ — работа выхода.

В структуре микротриода необходимо учитывать влияние электрического поля сетки на поток электронов, идущих от катода к аноду. Если напряжение сетки положительное, то между ней и катодом создается для электронов ускоряющее электрическое поле, которое складывается с ускоряющим полем анода; результирующее ускоряющее поле сетка—катод увеличивается, соответственно, больше электронов проходит сквозь сетку на анод. В результате ток возрастает тем больше, чем выше положительное напряжение на сетке.

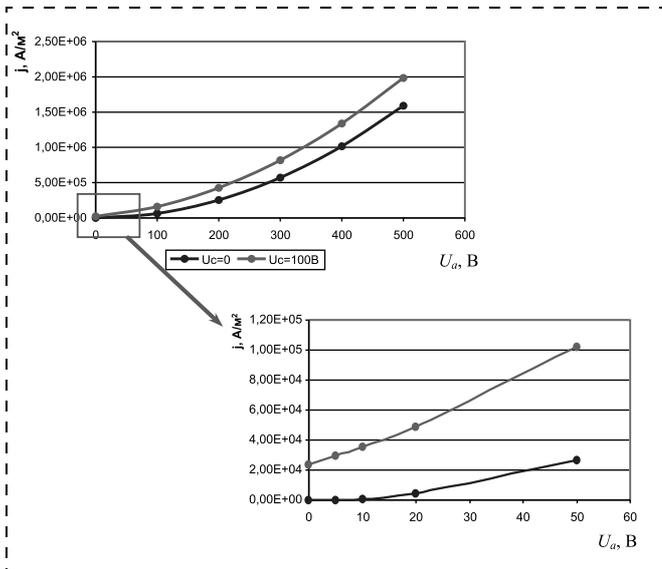


Рис. 7. График зависимости плотности тока эмиссии от напряжения анода

Это подтверждается графиком (рис. 7). При наличии положительного напряжения на сетке значительные плотности тока полевой эмиссии больше.

На графике (рис. 8) приведена зависимость тока анода от напряжения анода при разных напряжениях сетки при площади катода 200 мкм^2 .

Ток анода и влияние изменения расстояния между электродами на ток анода (рис. 9) были рассчитаны по следующей формуле, в которой учитывается коэффициент усиления поля, зависящий от формы эмиттера:

$$I = 2,33 \cdot 10^{-6} \frac{F}{z_a^2} \left(\frac{U_a h/2 + U_c(z_a + z_c)}{r \ln\left(\frac{z_a + z_c}{r}\right)} \right)^{3/2}, \quad (2)$$

где F — эффективная площадь эмиссии, мкм^2 ; U_a — напряжение на аноде, В; U_c — напряжение на сетке, В; z_a — расстояние от катода до анода, мкм ; z_c — расстояние от катода до сетки, мкм ; h — высота сетки, мкм ; r — радиус углеродной нанотрубки.

Сетка оказывает экранирующее действие от влияния напряжения анода на участке сетка—ка-

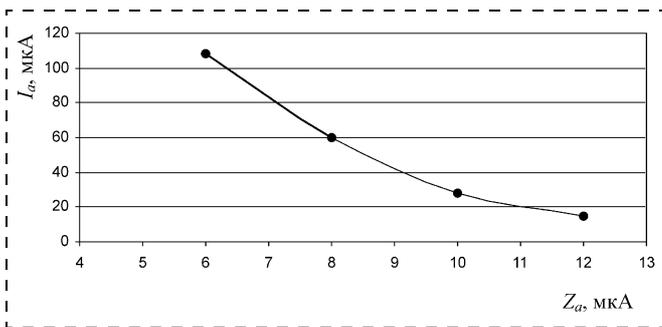


Рис. 9. График зависимости тока анода от расстояния анод—катод

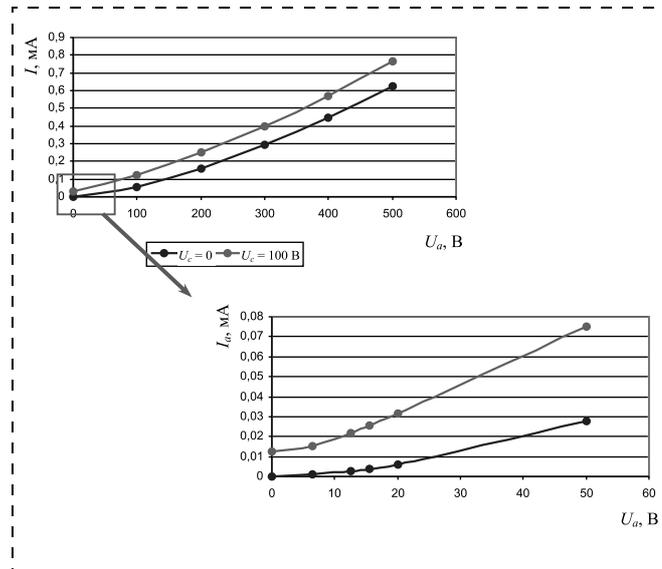


Рис. 8. График зависимости тока анода от напряжения анода

тод. В связи с этим был выполнен расчет влияния сетки на анодный ток триода. Эта зависимость выражается формулой:

$$U_d = \frac{U_c + DU_a}{1 + (z_a/z_c)^{4/3} D}, \quad (3)$$

где U_d — действующее напряжение, В; D — проницаемость сетки.

Экранирующее действие сетки тем сильнее, чем плотнее сетка (рис. 10). Следовательно, уменьшение прозрачности сетки увеличивает ток анода, однако при этом должно падать быстродействие триода, вследствие снижения его управляемости.

Был выполнен расчет времени пролета электронов от катода к аноду по формуле

$$\tau = 5 \cdot 10^{-8} \frac{z_a}{\sqrt{U_a}} \text{ [c]}, \quad (4)$$

$$\tau \approx 0,14 \text{ пс.}$$

Быстрота включения/выключения триода увеличивается при росте управляющего напряжения

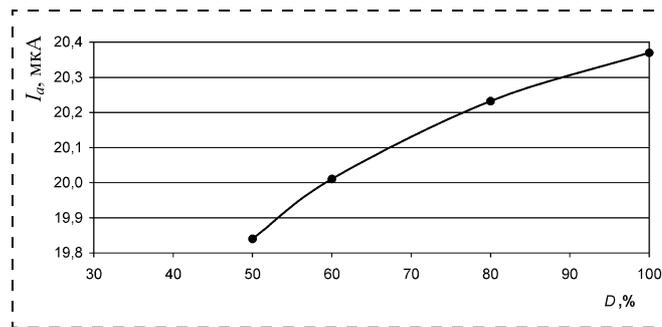


Рис. 10. Зависимость тока анода от проницаемости сетки

на аноде и уменьшении расстояния между электродами.

В 1987 году было открыто, что в качестве холодных катодов могут быть использованы ферроэлектрики (в частности, пьезокерамика) [5]. При этом можно получить очень высокую плотность эмиссионного тока (порядка 100 А/см², при плотности тока с углеродных нанотрубок 10 А/см²). Кроме этого существует еще одно важное преимущество при использовании ферроэлектриков. Это возможность получать ток эмиссии в отсутствие внешнего приложенного поля. Ферроэлектрики не нуждаются в обеспечении низким вакуумом,

они могут работать в газе со слабым давлением или плазме.

Список литературы

1. Пул Ч., Оуэнс Ф. Нанотехнологии. М.: Техносфера, 2005.
2. Parker R. K., Abrams R. H., Danly B. G., Levuch B. Vacuum electronics // IEEE transactions on microwave theory and techniques. 2002. March. Vol. 50. N 3.
3. Legagneux P., Minoux E., Hudanski L., Teo K., Groening O. GHz modulation of carbon nanotube cathodes for microwave amplifiers // 5th IEEE Conference of Nanotechnology.
4. Bower C., Shalom D., Zhu W., Lopez D., Kochanski G., Gammel P. L. A micromachined vacuum triode using carbon nanotube cold cathode // IEEE Tr. on el. devices. 2002. August. Vol. 49. N 8.
5. Cha-Mei tang. Microelectronic applications for RF sources and accelerators. National Institute of Standards and Technology, Gaithersburg.

УДК 621.385.833

В. М. Колешко, д-р техн. наук, проф.,
А. С. Чашинский, **Н. В. Хмурович**,
Белорусский национальный технический университет

СЕНСОРНЫЕ МОЛЕКУЛЯРНЫЕ КОНТЕЙНЕРЫ ВОДОРОДА

Представлены оригинальные результаты в области исследования молекулярных контейнеров на основе нанотрубок. Рассмотрена возможность использования углеродных нанотрубок в качестве чувствительного элемента в новом виде сенсорных устройств — сенсорном молекулярном контейнере. Проанализированы результаты исследования адсорбционных и емкостных свойств данного наноустройства. Описан теоретический подход вычисления емкостных свойств наноуглеродного материала молекулярных контейнеров.

Проблема хранения водорода

Прогресс в массовом использовании водорода в качестве экологически чистого источника энергии во многом зависит от решения проблемы эффективного способа его контроля, хранения и транспортировки. Однако ни один из применяемых в настоящее время методов хранения водорода (табл. 1) — под высоким давлением, в жидком состоянии, в гидридах металлов и интерметаллических соединений, в адсорбированном состоянии при пониженных температурах — не удовлетворяет предъявляемым требованиям.

Для сравнения представлены измерения количества водорода, поглощенного сорбентами другой природы (табл. 2). Различие между массой сорбированного и десорбированного водорода

указывает на некоторый вклад химической сорбции в механизм поглощения.

Наиболее перспективными для использования в качестве матриц, аккумулирующих водород, в настоящее время представляются углеродные нанотрубки (рис. 1) и их модификации, поскольку их водород-сорбционные возможности намного превышают известные для других способов хра-

Таблица 1

Традиционные методы хранения водорода

Методы хранения водорода	Содержание водорода в сорбенте, мас. %	Примечания
Газообразный H ₂ (300 К, 10 МПа)	100	Большая масса тары, малая объемная емкость
Жидкий H ₂ (20 К)	100	Высокая стоимость, большие потери
Металлогидридный TiH ₂ MgH ₂ Mg ₂ NiH ₄ TiFeH ₂	4,0 7,6 4,0 1,9	Необходимость подогрева, чувствительность к примесям

Таблица 2

Сорбционная способность некоторых материалов [3]

Образец	Масса, г	Количество поглощенного (десорбированного) H ₂	
		л/г	мас. %
Pd	0,223	0,24 (0,15)	2,07 (0,66)
LaNi ₅	1058	0,05 (0,03)	0,44 (0,13)
Активированный уголь	0,898	0,18	1,63
Графит	0,243	0,53	2,52
MnNi _{4,5} Al _{0,5}	0,742	0,38 (0,28)	3,33 (1,27)

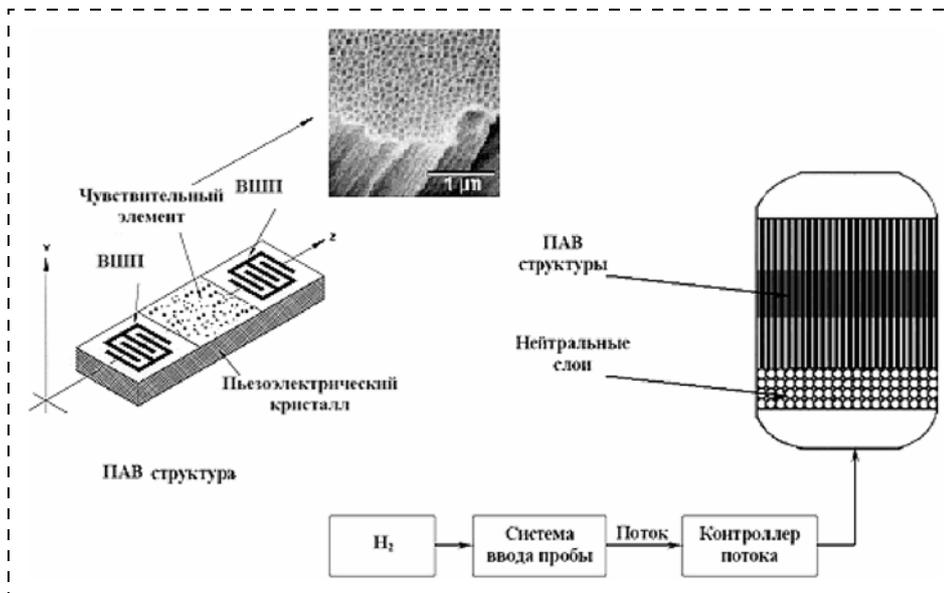


Рис. 1. Структурная схема молекулярного контейнера

нения водорода и близки к необходимым требованиям [1, 2].

Емкостные свойства углеродного материала молекулярных контейнеров

Оценим предельную сорбционную способность однослойной углеродной трубки. Массовая плотность такой структуры выражается соотношением [4]

$$\rho_c = \frac{4\sigma_c}{D} \text{ [г/см}^3\text{]}, \quad (1)$$

где $D = 10^{-8}$ см — диаметр нанотрубки; $\sigma_c = 0,77 \cdot 10^{-7}$ г/см² — максимальная поверхностная плотность углерода.

Получаем следующее соотношение для максимальной степени заполнения однослойной нанотрубки молекулярным водородом:

$$\eta_H = \frac{\rho_H}{\rho_H + \rho_c} \approx \frac{0,07}{0,07 + 30,4/D}, \quad (2)$$

где $\rho_H = 0,07$ (г/см³) — плотность водорода.

Как видно, степень заполнения однослойных нанотрубок возрастает с ростом их диаметра. Например, при диаметре в 1,5 нм максимальная степень заполнения водородом равна $\eta_H \approx 3,3$ мас. %. Степень заполнения $\eta_H = 6,5$ мас. %, достаточная для применения углеродных нанотрубок в молекулярных контейнерах для хранения водорода, достигается при использовании нанотрубок диаметром более 3 нм.

Жгут, составленный из однослойных углеродных нанотрубок (см. рис. 1) может рассматриваться как отдельная разновидность углеродной наноструктуры. Массовая плотность жгута, составленного из нанотрубок диаметром D с расстоянием ме-

жду поверхностями соседних нанотрубок d , описывается следующим выражением [4]:

$$\begin{aligned} \rho_c &= \sigma_c \frac{2\pi D}{\sqrt{3}(D+d)^2} = \\ &= 2,76 \cdot 10^{-7} \frac{D}{(D+d)^2} \text{ [г/см}^3\text{]}, \end{aligned} \quad (3)$$

где $\sigma_H = 2,56 \cdot 10^{-9}$ г/см² — максимальная поверхностная плотность водорода; $\sigma_c = 0,77 \cdot 10^{-7}$ г/см² — максимальная поверхностная плотность углерода.

Сорбционная емкость такого жгута оценивается на основе выражения (2) с учетом (3):

$$\eta_H = \frac{\rho_H}{\rho_H + \rho_c} \approx \frac{\rho_H}{\rho_H + 2,76 \cdot 10^{-7} D/(d+D)^2}, \quad (4)$$

где $\rho_H = 0,07$ г/см³ — плотность водорода.

В соответствии с выражением (4) сорбционная емкость жгута растет с ростом расстояния между поверхностями соседних нанотрубок и диаметром нанотрубок в жгуте.

Минимальное значение выражения (4) достигается при $D = d$ и равно

$$(\eta_H)_{\min} = \frac{0,07}{0,07 + (0,69 \cdot 10^{-7})/d}. \quad (5)$$

Принимая расстояние между соседними нанотрубками в жгуте равным 0,335 нм, получаем на основании (5) $(\eta_H)_{\min} \approx 3,3$ мас. %. В табл. 3 представлена зависимость сорбционной емкости жгута из однослойных нанотрубок (ОНТ) от диаметра при расстоянии между соседними нанотрубками 0,34 нм.

Таблица 3

Массовая емкость водорода в пучке ОНТ различного диаметра

Диаметр, нм	0,5	1	1,5	2	2,5	3
η_H , %	3,4	4,4	5,4	6,5	7,6	8,6

Таким образом, заполнение не только нанотрубок, но и полого пространства между ними дает ощутимый результат.

Сорбционные свойства углеродного материала молекулярных контейнеров

При моделировании адсорбционных свойств ОНТ использовался метод молекулярной динамики (ММД). При моделировании использовался потенциал Бреннера для описания атомных взаи-

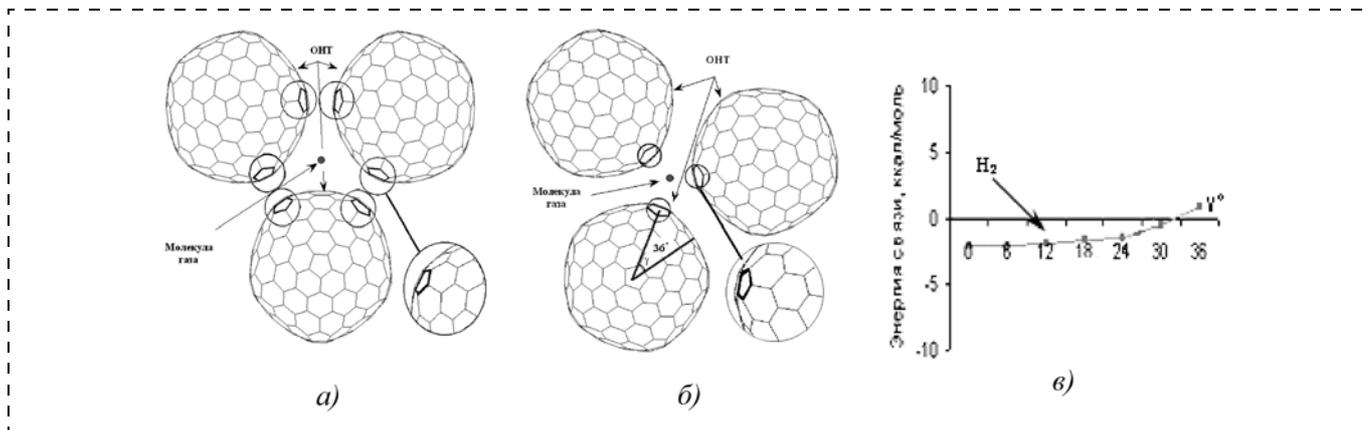


Рис. 2. Способы расположения трубок в пучке в зависимости от расположения пятигранников (а, б) и изменение энергий связи ΔE системы при различном угле γ (в)

мосвязей в водород- и углеродсодержащих системах для численного описания углеродных нанотрубок. Главный отличительный признак потенциала Бреннера заключается в том, что близлежащие взаимодействия химически активны, так что химические связи могут образовываться и разрушаться во время моделирования.

Исследование проводилось как на открытых трубках, так и на трубках, закрытых фуллереном с одной стороны. Было обнаружено, что при адсорбции газов на пучок трубок важно учитывать взаимное расположение крышек нанотрубок, в частности, пятигранников (рис. 2, а, б), которые возникают на крышках трубок в результате формирования крышек. Рассматривался пучок нанотрубок 10×10 с межтрубным расстоянием 0,334 нм. Газ свободно проникает между углеродными трубками, когда пятигранники расположены на наибольшем расстоянии r от адсорбированного газа (рис. 2, а). Однако при изменении расположения пятигранников относительно адсорбированного газа (рис. 2, б) увеличивается энергия системы (рис. 2, в), вплоть до появления энергетического барьера (для H_2 $\Delta E = 0$ при $\gamma \approx 34^\circ$).

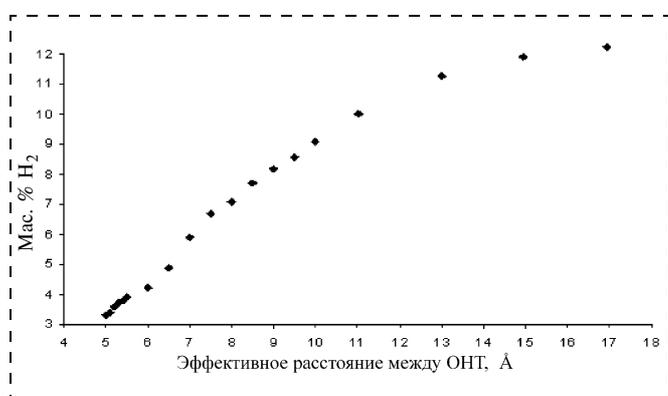


Рис. 4. Зависимость массового содержания H_2 от расстояния между нанотрубками

При исследовании емкостных свойств нанотрубок использовалась ячейка, состоящая из пучка нанотрубок. Адсорбция газа рассматривалась в два этапа. На первом этапе рассматривалась сорбция газа в зависимости от расстояния между поверхностями нанотрубок на внешней поверхности трубки, в результате чего образовывался внешний водородный слой (рис. 3, см. третью сторону обложки).

Получена зависимость массового содержания H_2 от расстояния между поверхностями трубок в жгуте (рис. 4).

Представленная зависимость показывает, что при расстоянии между ОНТ 1,3 нм (13 Å) зависимость массового содержания водорода становится нелинейной, так как при увеличении эффективного расстояния между нанотрубками влияние начинает оказывать не физическая сорбция между нанотрубкой и водородом, а водород-водородное взаимодействие (см. рис. 3, б). При этом состояние водорода становится менее стабильным, так как его десорбция может быть вызвана намного меньшей энергией (при изменении расстояния между нанотрубками от 1,3 до 1,4 нм энергия связи системы уменьшается на 40 ккал/моль, от 1,4

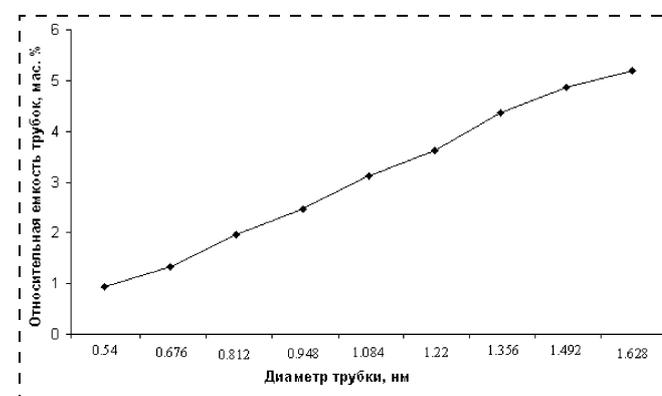


Рис. 6. Зависимость водородной емкости нанотрубок от диаметра наноуглеродного материала

до 1,5 нм — на 56 ккал/моль), что является опасным для хранения водорода. Таким образом, при сорбции газа между поверхностями нанотрубок на внешней поверхности трубки массовое содержание водорода допустимо в пределах 9...9,5 %.

Также рассматривалась сорбция водорода в зависимости от диаметра D нанотрубки (рис. 5, см. третью сторону обложки). Результаты представлены на рис. 6.

Если учесть, что при синтезе нанотрубок образуются преимущественно нанотрубки диаметром от 1,2 до 1,5 нм [5, 6], то при внутреннем заполнении нанотрубок массовое содержание водорода будет в пределах 4...4,5 %.

Заключение

Рассмотрены сорбционные и емкостные свойства углеродного материала. Представлены результаты адсорбции водорода на нанотрубки с различным расстоянием между ними и с различным диаметром. Показано, что при создании молекулярных контейнеров с использованием пучков

одностенных нанотрубок диаметром 1,2...1,5 нм с расстоянием между поверхностями нанотрубок ≈ 1 нм, массовое содержание водорода будет находиться в пределах 11...12 %. А данная степень заполнения достаточна для применения углеродных нанотрубок в молекулярных контейнерах для хранения водорода.

Список литературы

1. **Колешко В. М., Баркалин В. В., Полинкова Е. В.** Сенсорные микросистемы на основе углеродных и алмазоподобных пленок // Технологические системы информации в инженерии продукции. Люблин, Польша, 2001. С. 276—279.
2. **Колешко В. М., Ходин А. А.** Датчик водорода. Авторское свидетельство № 1415901 от 03.01.1985.
3. **Chambers A.** et al. Hydrogen and materials // J. Phys. Chem., 1998. V. B 102. P. 4253—4268.
4. **Елецкий А. В.** Сорбционные свойства углеродных наноструктур // УФН. 2004. Т. 174. № 11. С. 1191—1231.
5. **Раков Э. Г.** Химия и применение углеродных нанотрубок // Успехи химии. 2001. Т. 70. С. 934—973.
6. **Елецкий А. В.** Углеродные нанотрубки // УФН. 1997. Т. 167. С. 945—972.
7. **Los J. K., Fasolino A.** Monte Carlo simulations of carbon-based structures based on an extended Brenner potential // Computer Physics Communications, USA. 2002. № 147. P. 178—181.

УДК 531.383

С. П. Тимошенков, д-р техн. наук, проф.,
С. А. Зотов, канд. техн. наук, доц.,
В. В. Калугин, канд. техн. наук, доц.,
В. Н. Бальчев, Е. С. Морозова,
Московский институт электронной техники
(технический университет)

РАЗРАБОТКА МИКРОПРИВОДА ДЛЯ УПРАВЛЕНИЯ МИКРОЗЕРКАЛОМ

Разработана конструкция сложно-функционального микроэлектромеханического привода, особенностью которого является крепление матрицы отражающих элементов на торсионах крестообразной формы. Представлен анализ зон статической неустойчивости в системе упругий подвес — электростатический двигатель. Приведены результаты проведенных испытаний микроэлектромеханического привода.

Сложно-функциональный микроэлектромеханический привод (СФМП) и изделия на его основе относятся к одному из классов микроэлектромеханических приборов и систем (МЭМС), предназначенных для преобразования электрической энергии в механическую и измерения параметров этого преобразования. Целью данной разработки является создание в России СФМП и изделий на его основе для использования как в изделиях специального назначения, где применение импортных может иметь непредсказуемые по-

следствия, так и на развивающемся быстрыми темпами рынке гражданских МЭМС.

МЭМС преобразователи, имеющие в своем составе кремниевые исполнительные элементы, обладают рядом значительных преимуществ по сравнению с известными приборами того же функционального назначения, выполненными по традиционной технологии. МЭМС преобразователи имеют высокое быстродействие, значительно меньшую стоимость, меньшие габаритные размеры, больший спектр применения, невысокое энергопотребление, высокую ударо- и вибропрочность. Низкая стоимость МЭМС преобразователей объясняется высокой степенью интеграции, полной автоматизацией процесса изготовления на базе уже существующих технологий, принятых в микроэлектронике, а также возможностью выпуска приборов большими партиями.

Основные области применения микроэлектромеханического привода: системы стабилизации оптической линии визирования, системы оптического сканирования, стабилизации изображений, системы управления по лазерному и инфракрасному лучу, высокочастотные многоканальные оптические переключатели, зеркальные матрицы, электрические микропереключатели, шаговые исполнительные механизмы, системы высокоточного позиционирования, системы микродвигателей, управление микрозеркалом, системы обратной связи в микромеханических системах, систе-

мы контроля за состоянием объектов, системы датчиков микроперемещений и микроусилий.

Находят применение и конструкции микрозеркал с несколькими устойчивыми положениями. Предложено устройство, содержащее матрицу микрозеркал, каждое из которых относительно среднего положения может занимать два стабильных состояния [1].

Разработаны микрозеркала с регулированием углового положения отражающей части [2]. В конструкции управляющие электроды возбуждаются при подаче напряжения в течение фиксированного промежутка времени. Напряжение выбирается таким образом, чтобы обеспечить позиционирование под заданным углом. Операция последовательного возбуждения электродов повторяется для сохранения углового положения зеркала.

Фирмой *Analog Devices* разработана конструкция микрозеркала с непрерывным регулированием углового положения со следующими параметрами: диаметр отражающей части — 0,8 мм; максимальный угол отклонения — 5°; собственная частота колебаний — 500 Гц [3].

Была разработана матрица микрозеркал [4] для переключения оптических сигналов с несколькими устойчивыми положениями. Особенность предложенной конструкции в том, что отражающие элементы в такой матрице закреплены на фиксирующихся шарнирах, а не на гибких элементах недеформирующихся подложек. Матрица микрозеркал может быть получена стандартными методами микрообработки поверхностей. Такие зеркала имеют несколько устойчивых положений в отличие от микрозеркал непрерывного действия, в которых упругая возвращающая сила гибких элементов уравнивает электростатическую силу.

Кроме того, предложено [5] непрерывно регулируемое аналоговое устройство с микрозеркалом, содержащим диэлектрическую жидкость между отражательным элементом и электродами. Диэлектрическая жидкость применяется для увеличения силы, действующей на подвижный элемент при приложении напряжения, а также для отвода теплоты.

Коллективом авторов МИЭТ (Зеленоград, г. Москва) спроектирована и изготовлена оригинальная конструкция микропривода, особенностью которого, в отличие от рассмотренных выше устройств, является точная настройка углового положения. Отличительной особенностью конструкции является высокая вибро- и удароустойчивость, обеспечиваемая сочетанием использования в подвесе крестообразных торсионов и выборкой массы на подвижной части.

Конструктивная схема электромеханического узла микропривода представлена на рис. 1.

Микропривод содержит проводящую подвижную часть 1, подвешенную с помощью крестообраз-

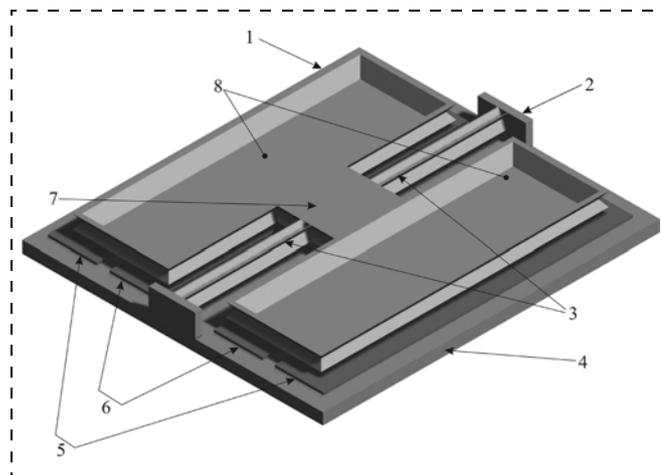


Рис. 1. Конструктивная схема электромеханического узла микропривода

разных торсионов 3 в корпусе 2. Корпус вместе с подвесом инерционной массы закреплен на электрической плате, представляющей собой стеклянную пластину 4 с двумя парами электродов, симметрично расположенных относительно оси подвеса, — соответственно электродов 5 емкостной системы съема перемещений и электродов 6 электростатического датчика момента (микродвигателя). Расширение полосы частот (и следовательно, увеличение быстродействия) обеспечивается удалением массы на внешней стороне обоих плеч подвижной части — на ней сделаны углубления 8. Центральная часть 7 является достаточно гладкой и служит отражающей поверхностью для управляемого луча. Фотографии элементов изготовленных опытных образцов микропривода приведены на рис. 2.

При подаче напряжения на обкладки датчика момента возникает управляющий момент силы, направленный по оси торсиона, который компенсируется моментом упругих сил, возникающим в торсионе при его деформации, моментом сил инерции, диссипативными силами рассеяния (рис. 3).

Микропривод предназначен для работы в двух режимах: 1) отклонение подвижного элемента 1 на заданный угол; 2) непрерывный режим скани-

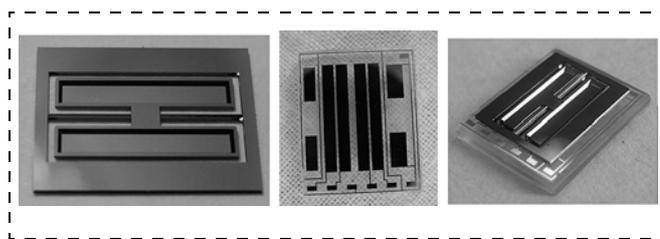


Рис. 2. Элементы конструкции микропривода:

а — кремниевый подвижный элемент; б — стеклянная подложка с обкладками датчиков момента и датчиков перемещения; в — кремниевый подвижный элемент на стеклянной подложке

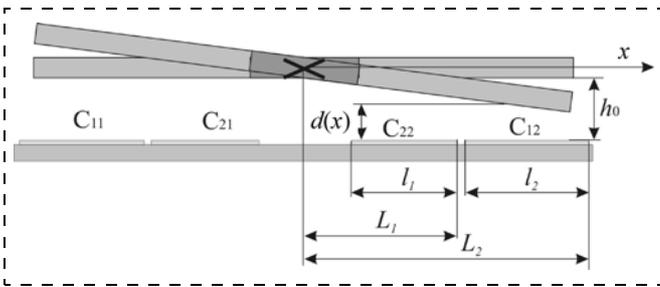


Рис. 3. К определению управляющего момента

рования, при котором подвижный элемент совершает осциллирующие движения.

В работе рассматривается режим работы при отклонении электромеханического узла микропривода на заданный угол.

Угол отклонения электромеханического узла микропривода найдем из уравнения статического равновесия

$$M_{\text{эл}} = M_{\text{мех}}, \quad (1)$$

где $M_{\text{эл}}$, $M_{\text{мех}}$ — электростатический и механический моменты сил.

При подаче напряжения на любую из обкладок возникает электростатический момент силы

$$M_{\text{эл}} = \frac{\varepsilon \varepsilon_0 b U^2}{2} \left\{ \frac{1}{\alpha} \left(\frac{L}{h_0 - \alpha L} - \frac{L-l}{h_0 - \alpha(L-l)} \right) - \frac{1}{\alpha^2} \ln \left(1 + \frac{\alpha l}{h_0 - \alpha L} \right) \right\}, \quad (2)$$

где U — управляющее напряжение; L — половина ширины подвижной части; l — длина обкладки конденсатора ($l = l_1$ или $l = l_2$, см. рис. 3), ε — коэффициент диэлектрической проницаемости; ε_0 — электрическая постоянная; b — ширина чувствительного элемента; α — угол поворота чувствительного элемента (ЧЭ); h_0 — начальный зазор.

Согласно принципу Сен-Венана можно рассматривать крестообразный торсион как два независимых прямоугольных стержня, не связанных между собой, при этом крутящий момент, возникающий в крестообразном торсионе, будет определяться зависимостью¹

$$M_{\text{мех}} = 4 \frac{\alpha}{l_m} G h_m b_m^3 \left[\frac{1}{3} - \frac{64}{\pi^5} \frac{h_m}{b_m} \sum_{k=0}^{\infty} \frac{\text{th} \frac{(2k+1)\pi b_m}{2h_m}}{(2k+1)^5} \right], \quad (3)$$

¹ Впервые задача о кручении бруса прямоугольного сечения была решена Сен-Венаном, см. например, работу [6].

где l_m — длина торсиона; α — угловая координата, определяющая положение подвижного элемента; b_m и h_m — толщина и высота торсиона; G — модуль упругости 2-го рода.

Бесконечные ряды в формуле (3) быстро сходятся, и для практических расчетов при отношении $b_m/h_m > 10$ удобно пользоваться зависимостью

$$M_{\text{мех}} = \frac{4}{3} \frac{G h_m^3 b_m}{l_m} \alpha. \quad (4)$$

Плавное увеличение напряжения на любой из обкладок приводит к плавному увеличению угла отклонения ЧЭ, однако при некотором критическом угле отклонения возникает бифуркационный эффект опрокидывания ЧЭ на статорную подложку. Данный эффект имеет простое объяснение.

В силу того, что функция для электростатического момента $M_{\text{эл}}$ возрастает на всем допустимом диапазоне значений α и не имеет точек перегибов, а механический момент линейно зависит от угла α возможны лишь три случая взаимного расположения графиков электростатического и механического моментов: 1) графики электростатического момента и механического момента имеют две точки пересечения; 2) графики имеют одну точку пересечения (график механического момента является касательной к графику электростатического момента); 3) графики не пересекаются.

Рассмотрим каждый из трех случаев отдельно.

Две точки пересечения (рис. 4). Точки 1 и 2 определяют пересечения графиков функций электростатического и механического моментов и являются положением равновесия. Разобьем абрисами точек 1 и 2 ось α на три зоны (условно обозначим зоны I, II, III). Из рис. 4 видно, что в зоне I выполняется условие $|M_{\text{эл1}}| > |M_{\text{мех}}|$, для зоны II $|M_{\text{эл1}}| < |M_{\text{мех}}|$, для зоны III $|M_{\text{эл1}}| > |M_{\text{мех}}|$. Отмечая, что механический момент возвращает ЧЭ в нейтральное положение, а электростатический момент выводит подвижную систему СФМ из данного положения, заключаем, что зоны I, II —

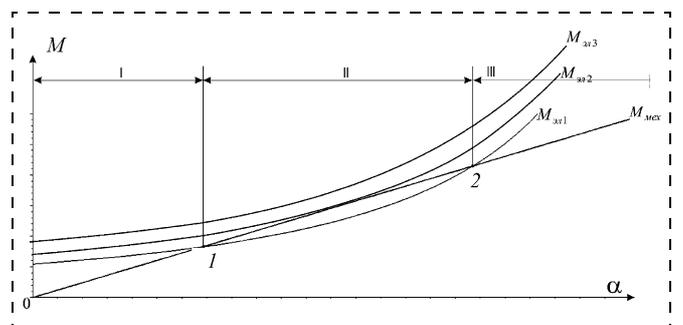


Рис. 4. Зависимость электростатического и механического моментов от угла поворота подвижной части

устойчивые зоны, а зона III — неустойчивая зона. Следовательно, точка 1 — точка устойчивого положения равновесия, а точка 2 — точка неустойчивого положения равновесия.

Таким образом, в случае, если графики электростатического момента и механического момента имеют две точки пересечения, вторая точка пересечения определяет границу устойчивости.

Одна точка пересечения. Из рис. 4 видно до точки касания графиков выполняется условие $|M_{эл2}| > |M_{мех}|$, после точки пересечения графиков $|M_{эл2}| < |M_{мех}|$. Следовательно, точка пересечения графиков — точка устойчивого неустойчивого положения равновесия и система не имеет зон устойчивости.

Графики не пересекаются. Из рис. 4 видно $|M_{эл3}| > |M_{мех}|$. Следовательно, система не имеет зон устойчивости.

Из выражения (2) видно, что в функцию зависимости электростатического момента от угла α напряжение U (точнее квадрат напряжения) входит как масштабный коэффициент, поэтому при увеличении напряжения U происходит подъем графика электростатического момента, что приводит к сближению точек пересечения графиков электростатического и механического моментов (точки 1 и 2, см. рис. 4), при некотором критическом напряжении точки 1 и 2 сливаются, это приводит к потере устойчивости и опрокидыванию ЧЭ на статорную обкладку.

Данный эффект наблюдался при проведении испытаний экспериментальных образцов микропривода.

Таким образом, в системе упругий подвес — электростатический двигатель возможно возникновение эффекта опрокидывания. Предложенные в работе соотношения позволяют выбирать оптимальные конструктивные параметры подобных устройств с учетом данного эффекта.

На кафедре "Микроэлектроника" МИЭТ была изготовлена партия опытных микроприводов, испытания которых подтвердили высокую эффек-

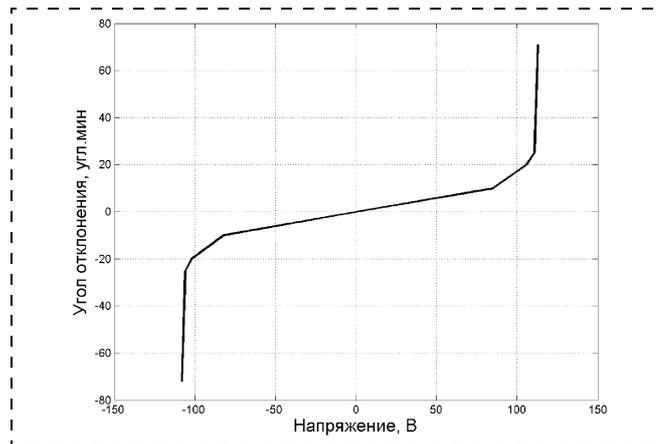


Рис. 5. Зависимость угла отклонения подвижной части СФМ от управляющего напряжения

тивность предложенных технических решений. В табл. 1 приведены типовые результаты испытаний образцов микропривода, из которых видно, что при подаче на одну из обкладок управляющего напряжения, превышающего некоторое критическое значение, происходит опрокидывание ЧЭ. На рис. 5 представлен график зависимости угла отклонения подвижной части СФМ от управляющего напряжения.

В результате проведения испытаний партии опытных образцов были получены основные параметры микромеханических приводов, которые представлены в табл. 2.

Таблица 2

Основные параметры микромеханических приводов

Диапазон угловых перемещений, угл. градус	Полоса пропускания, Гц	Точность позиционирования, % от диапазона	Управляющее напряжение, В
0—1	0—50	0,1	0—60
0—2	0—50	0,1	0—100
0—3	0—50	0,1	0—120

При создании микропривода использованы следующие оригинальные решения: конструкции подвесов и приводов; обработка поверхности подвесов; применение технологии кремний-на-изоляторе; сопряжение кремниевых элементов с элементами, выполненными из кремния и из других материалов; электрические схемы обработки сигнала; алгоритмы формирования управляющего сигнала в цепи обратной связи.

Такие решения позволяют: снизить влияние паразитных степеней свободы на динамику привода; улучшить точность датчиков и исполнительных устройств; обеспечить устойчивость к перегрузкам; фиксировать значения перемещений привода на уровне нанометров; обеспечить высокую прочность соединения с относительно невысокими механическими напряжениями в месте соедине-

Таблица 1

Зависимость угла отклонения подвижной части СФМ от управляющего напряжения

Напряжение, В		Угол отклонения подвижной части СФМ, угл. мин	Примечания
1 обкл.	2 обкл.		
173	0	-93 (1°33')	Опрокидывание
169,5	0	-40	
161	0	-30	
143	0	-20	
109	0	-10	
0	0	0	
0	109	10	Опрокидывание
0	145	20	
0	165	30	
0	175	40	
0	177	112 (1°52')	
0	177	112 (1°52')	

ния; снизить погрешности приборов при их использовании в широком температурном диапазоне.

Список литературы

1. **Способ** адресации бистабильного цифрового микрозеркального устройства // Изобретения стран мира. 2005. Вып. 87. № 2. С. 126.
2. **Микрозеркальная** матрица с регулированием углового положения зеркал // Изобретения стран мира. 2004. Вып. 87. № 7. С. 87.

3. **Mirrors** with Integrated Position-Sense Electronics for Optical-Switching Applications // Analog dialogue. 2002. 36—04. P. 3—4.

4. **Микрозеркала** без гибких элементов с несколькими устойчивыми положениями для переключения оптических сигналов // Изобретения стран мира. 2001. Вып. 87. № 3. С. 122.

5. **Непрерывно** регулируемое аналоговое устройство с микрозеркалом // Изобретения стран мира. 2004. Вып. 87. № 12. С. 71.

6. **Рекач В. Г.** Руководство к решению задач по теории упругости. М.: Высш. школа, 1977. 216 с.

ПРИМЕНЕНИЕ НМСТ

УДК 003.26

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

ЛЮМИНЕСЦЕНТНЫЕ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫЕ НАНОЧАСТИЦЫ

В настоящей обзорной статье рассмотрены вопросы применения полупроводниковых наночастиц. Представлены фотоника, биотехнология и медицина.

В журнале "Нано- и микросистемная техника" (№ 6, 2006, с. 54) в рубрике "Новости нанотехнологий" освещены вопросы применения наночастиц в медицинской диагностике и лечении рака. Интерес к наночастицам возрос благодаря исследованиям, показавшим, что при переходе от микро- к наночастицам происходит качественное изменение физико-химических свойств веществ. Это связано с тем, что для частиц, размеры которых хотя бы по одному из направлений соизмеримы (или меньше) с радиусом корреляции какого-либо физического или химического свойства (длиной свободного пробега электронов, размером зародыша новой фазы, размером магнитного домена и т. д.), начинают проявляться размерные эффекты. Квантовые точки — это нуль-мерные (0D) структуры, в которых движение носителей заряда ограничено во всех трех направлениях. Существует множество областей применения нанокристаллов (наночастиц). Ниже приведены примеры применения нанокристаллов в ключевой области — биологии [1—6].

Светоизлучающие диоды

Электролюминесцентные свойства полупроводниковых нанокристаллов делают их подходящими для применения в светоизлучающих диодах (СИД),

обычно в сочетании с полупроводниковым полимером [7]. Использовались CdSe-нанокристаллы в комбинации с поли(р-фениленвиниленом) (poly(p-phenylenevinylene)). Из-за возможности настройки длины волны нанокристаллов и их узкого спектра излучения производство микроустройств существенно упрощается. Кроме того, подобно органическим полимерам квантовые точки имеют высокую стабильность.

В результате исследований была улучшена технология получения двухслойных нанокристаллов типа ядро/оболочка (в данном случае CdSe/ZnS). Эти нанокристаллы характеризуются большой квантовой эффективностью, стабильностью к фотоокислению (что приводит к увеличению времени работы микроустройства) и улучшенными электрическими параметрами [8]. Рис. 1 (см. четвертую сторону обложки) отражает структуру двухслойных нанокристаллов CdSe/ZnS [9]. На рис. 2 показана структурная схема СИД [10], где введены обозначения: 1) подложка (анод); 2) органическое основание; 3) слой переноса электронов; 4) катод; 5) оболочка нанокристалла (CdS, ZnS); 6) покрытие, связывающее нанокристаллы с органическим основанием (олеиновая кислота или оксид триоктилфосфина) (trioctylphosphine oxide, TOPO); 7) ядро полупроводникового нанокристалла (PbSe, CdSe).

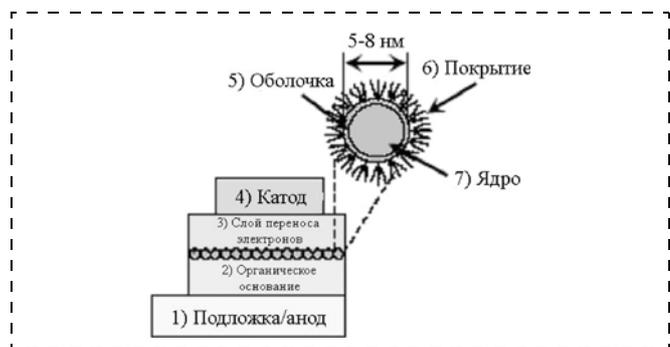


Рис. 2. Схема СИД с полупроводниковыми нанокристаллами [10]

Лазеры

Авторы [11] продемонстрировали излучение когерентного света в плотноупакованных пленках из CdSe-нанокристаллов. Другие авторы получили подобные результаты с кремнием [12]. Исследования по применению квантовых точек в лазерах продолжаются [13].

Солнечные батареи

Нанокристаллы нашли применение в фотонике. Авторы [14] продемонстрировали гибридные солнечные ячейки из CdSe-нанотрубок, встроенных в полимерную матрицу. Солнечная конверсионная эффективность гибридных солнечных ячеек равна только 1,7 %, тогда как обычные ячейки имеют эффективность 10 %. Показатель будет улучшен, поскольку процесс производства материалов постоянно совершенствуется. Спектр поглощения ячеек может быть настроен изменением диаметра нанотрубок. Нанотрубки работают лучше, потому что они обеспечивают высокую проводимость для носителей заряда (электронов и дырок). Увеличение солнечной конверсионной эффективности может быть достигнуто ориентацией трубок перпендикулярно электродам [14].

Одноэлектронные транзисторы

В работе [15] рассмотрен случай, когда сферический нанокристалл CdSe помещается в среду с диэлектрической проницаемостью ϵ . Его емкость $C = \epsilon R$, а потенциал $\phi = q/C$, где q — электрический заряд. Для нанокристалла радиусом R в несколько нанометров емкость составляет примерно 10^{-18} Ф. Если поместить в него электрон (заряд $1,6 \cdot 10^{-19}$ Кл), то его потенциал изменится на $\sim 0,1$ В и будет увеличиваться пропорционально $1/R$. Этого потенциала достаточно, чтобы воспрепятствовать движению других электронов.

Схематическое изображение одноэлектронного транзистора SET — single electron transistors с нанокристаллом CdSe в качестве активного элемента приведено на рис. 3 [15]. На подготовленную структуру осаждают нанокристаллы, один из которых становится активным элементом.

Прибор изготавливают на кремниевой подложке, на нее можно подать напряжение U_g для изменения положения уровня энергии в нанокристалле. Подложка отделена слоем диэлектрика SiO_2 от золотых электродов, на которые высажены нанокристаллы. Сопротивление прибора около 10 МОм [15]. На структуре экспериментально хорошо демонстрируются атомные свойства квантовых точек. Если приложить небольшое (несколько милливольт) напряжение U между электродами, то при определенном напряжении U_g (рис. 3) электрон может попасть в нанокристалл. Электрон попадет на уровень в квантовой точке, если его энергия совпадет с энергией уровня. Число электронов в квантовой точке можно из-

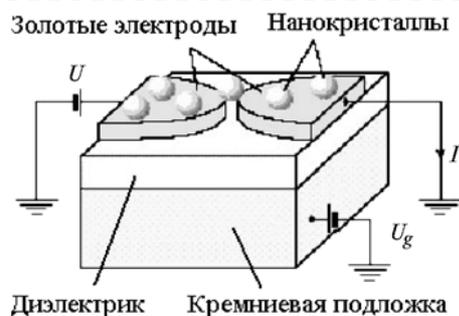


Рис. 3. Одноэлектронный транзистор с нанокристаллом CdSe [15]

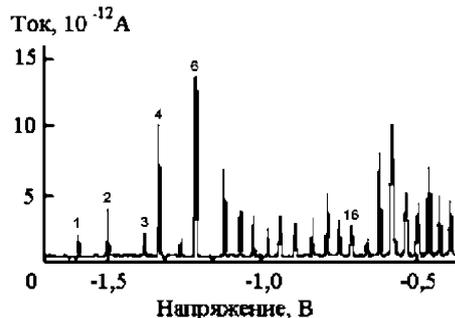


Рис. 4. Зависимость тока от напряжения при последовательном заполнении электронами по одному для одной квантовой точки [15]

менять по одному. При этом наблюдается всплеск силы тока, составляющий 10^{-12} А. При дальнейшем изменении U_g опять произойдет всплеск силы тока. Число всплесков зависит от числа уровней размерного квантования и определяется размерами нанокристалла.

Прибор работает при очень низких температурах. На рис. 4 приведена зависимость тока, проходящего через квантовую точку, от напряжения (U_g), которое изменяет положение уровня энергии в точке. Каждый пик соответствует прохождению одного или нескольких электронов. Числа у пиков — число прошедших электронов. Наблюдаются две особенности: расстояния между пиками не равны и амплитуды пиков разные. Амплитуда пиков определяет энергию. В результате взаимодействия электронов энергия (положение уровня) зависит от числа электронов, находящихся на уровнях размерного квантования. Это приводит к изменению расстояния между пиками. Без взаимодействия уровни должны быть расположены на одинаковом расстоянии.

Биологические применения

В этой области используются уникальные флуоресцентные свойства наночастиц. Ключевой особенностью применений нанокристаллов является мультиплексирование — способность вывести множество сигналов одновременно в виде различных неперекрываемых спектров излучения с помощью одной длины волны возбуждения. Другими ключевыми особенностями нанокристаллов

являются их фотостабильность, высокая интенсивность излучения и хорошо приспособляемая к другим веществам химически активная поверхность. Например, возможно сопряжение нанокристаллов с такими молекулами, как стрептавидин, биотин, антитела или олигонуклеотиды, которые из-за своих специфических молекулярных свойств используются в биологическом анализе [16].

Иммуноцитохимия

Исследователи используют нанокристаллы просто как замену для органических флуорофоров при маркировке клеточных компонентов [17–19], которая традиционно выполняется флуоресцентными антителами или авидином. Нанокристаллы проводят локализацию большинства клеточных компонентов одновременно и с меньшим фотобликингом (фотобликинг — фоторазмытость изображения). Кроме того, что очень важно, различие во флуоресцентных временах жизни делает излучение нанокристаллов отличным от клеточной автофлуоресценции [20–22].

Блотирование

Блотирование — получение реплики (отпечатка) контактным способом.

Антитела и авидиновые молекулы, сопряженные с ферментами, применяются для обнаружения незначительного количества белка калориметрическим или хемилюминесцентным методом [23]. Традиционное блотирование используется для обнаружения белков, которые отделяются электрофорезом, блотирование с помощью наночастиц — для анализа нерастворенной смеси белков.

Традиционные методы не позволяют осуществлять мультиплексирование: маркер может быть использован для одновременного зондирования только одной молекулы, которая требует применения реплицируемого маркера. Калориметрические методы особенно слабы для количественных измерений. Предложено использовать сопряженные нанокристаллы с антителами. Метод приспособлен для мультиплексированного количественного обнаружения белков при блотировании [23]. Точно так же сопряженные нанокристаллы могут использоваться при иммуноанализе.

ДНК-связанные нанокристаллы

Преыдушие области применения касаются нанокристаллов, сопряженных с молекулами белка. Но существует множество областей применения для нанокристаллов, присоединенных к олигонуклеотидам или другим нуклеиновым кислотам. Например, их можно использовать для увеличения числа каналов, которые необходимы для анализа микронаборов ДНК [24, 25]. Яркая флуоресценция нанокристаллов и их высокая стабильность к фотобликингу значительно увеличивает чувствительность данной технологии.

Раскраска хромосом

К другим применениям ДНК-связанных нанокристаллов можно отнести fluorescence in situ hybridisation (FISH) (рис. 5). Методика используется для "раскраски" хромосом в различные цвета (для других специфических использований). И снова нанокристаллы обеспечили способность выдавать информацию для большого числа образцов при единственном анализе. Олигонуклеотиды можно присоединить непосредственно к гидроксильированным квантовым точкам [26] или косвенно, используя биотинилированные олигонуклеотиды и стрептавидин-нанокристаллы [27].

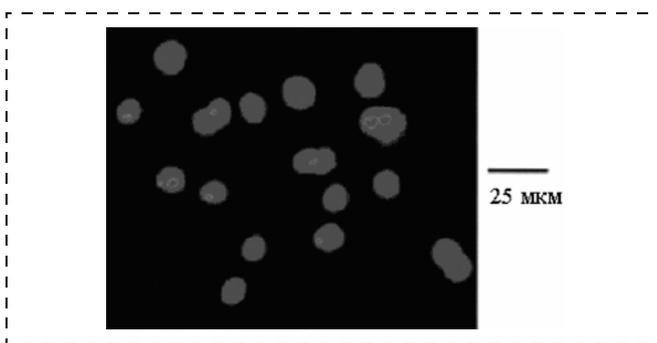


Рис. 5. FISH-микроснимок с зондами из красных квантовых точек [26]

Штрих-коды

Одним из интересных направлений использования нанокристаллов является производство штрих-кодов путем комбинации (микросборки) нанокристаллов с различной длиной волны излучения [28, 29] или даже объединением их в ячейки [30]. Предложено использование шести цветов нанокристаллов с шестью уровнями интенсивности для получения десятков тысяч кодов [16]. Гидрофобные нанокристаллы могут быть объединены в пористые полистироловые бусинки с определенным их числом. Флуоресцентный спектр получен от индивидуальных бусинок с достаточной точностью, чтобы дать высокую надежность обнаружения всей микросистемы (~99 %). Поверхность бусинки может нести маркированную молекулу: олигонуклеотид, пептид или антитело.

Маркировка живых клеток и тканей

Квантовые точки предложены для применения как терапевтические агенты. В [31] описано применение квантовых точек для маркировки живых клеток. Квантовые точки могут быть внедрены эндоцитозом или с помощью маркированных мембранных белков. Маркированные клетки наблюдались в течение долгого интервала времени без потери маркера. Они не причиняли вреда животным. Авторы [32] отслеживали распространение индивидуальных глициновых рецепторов,

маркированных антителом, сопряженным с квантовыми точками, на мембранах живых нейронов.

Дубертрет и др. [33] показали, что покрытые мицеллой квантовые точки могут быть введены в *Xenopus* эмбрионы. Квантовые точки остаются стабильными и их можно наблюдать в течение развития головастика. Это позволяет отслеживать последовательности клеточных поколений. Никакой кризисной токсичности или отклонений в развитии, вызванных точками, не наблюдалось. На рис. 6 (см. четвертую сторону обложки) проиллюстрировано отслеживание различных стадий головастика:

А — квантовые точки, покрытые мицеллой, вводятся в отдельный бластомер в период самой ранней стадии деления;

В — инъекция одной клетки из восьмиклеточного эмбриона, приводящая к маркировке отдельного бластомера;

С — тот же самый эмбрион спустя 1 ч;

Д — помеченные дочерние клетки введенного бластомера;

Е — помеченные дочерние клетки введенного бластомера в более поздней стадии;

Ф — внутриклеточная маркировка аксона и сомитов головастика на 40-й стадии;

Г — квантовые точки локализуются в ядре в течение средней стадии процесса бластуляции;

Н — помеченные клетки перемещаются в жаберные дужки;

И — флуоресценция квантовых точек, наблюдаемая внутри эмбриона.

Масштаб: В, С, D, Е, Н, I — 0,5 мм; F, G — 30 мкм.

Авторы [34] использовали квантовые точки для определения направлений распространения раковой опухоли у подопытного животного (свинки). Применялись метки, излучающие свет в области спектра, близкой к инфракрасной. Метки вводились в организм животного через кровь. Полупроводниковые метки осели на раковых клетках, благодаря люминесценции удалось наблюдать через кожу животного место расположения опухоли. Рис. 7, А показывает картинку, регистрируемую специальным прибором, рис. 7, В, D отображают процесс хирургического удаления опухоли, рис. 7, С — снимок, выполненный специальной черно-белой фотокамерой (см. четвертую сторону обложки).

Проследивание потока крови

Ларсон и др. [35] использовали квантовые точки для проследивания потока крови в живых мышцах. Исследователи отображали точки с помощью многофотонной флуоресцентной микроскопии, которая позволяет осуществлять визуализацию через толстые образцы, например, через кожу живых животных. Авторы показали, что квантовые точки являются уникально подходящими для этой методики, поскольку они имеют исключи-

тельно высокие поперечные сечения двухфотонного взаимодействия. Мыши не перенесли никаких опасных эффектов.

Медицина

Исследователи использовали квантовые точки ближней ИК части спектра для выделения лимфоузлов [36]. Авторы [37] показали, что наночастицы могут доставляться к определенным тканям при покрытии их соответствующими пептидами. Ключевым вопросом в таких медицинских применениях, и несомненно в любом *in vivo* исследовании или исследовании живых клеток, является возможная токсичность квантовых точек. Их структура содержит ядовитые компоненты, из них кадмий — самый существенный. Не ясно, насколько токсичны квантовые точки. Исследователи [38] установили, что точки селенида кадмия действительно могут быть очень цитотоксическими. Особенно, если имеет место окисление поверхности нанокристалла, что приводит к освобождению свободного кадмия. Они также показали, что токсичность может быть уменьшена путем покрытия квантовых точек оболочкой ZnS, хотя такие меры не могут быть радикальными при *in vivo* исследовании. Данная проблематика отражена в [39] в связи с беспокойствами о возможном вреде наночастиц здоровью человека.

Дактилоскопия

В работе [40] рассматривается возможность применения наночастиц CdSe/ZnS для разработки новых люминофоров для задач криминалистики. Одной из важных задач криминалистики является обнаружение скрытых следов пальцев рук. Традиционные порошковые методы оказываются неэффективными для целого ряда поверхностей. Это связано с тем, что спектр фоновой люминесценции подложки перекрывается спектром люминесценции красителя, что приводит к ухудшению контраста полученного изображения. Авторами [40] были получены люминесцентные изображения следов пальцев, обработанных люминофорами на основе наночастиц, на широком классе поверхностей. Разработанные люминофоры позволяют получать контрастные изображения на подложках с различной фоновой люминесценцией.

Заключение

В настоящее время в методах биоспецифического связывания, основанных на определенном "узнавании" возбудителя, его антигенов и (или) продуктов метаболизма, используются антитела, меченные химическими флуорохромами или радиоактивными изотопами. Полупроводниковые нанокристаллы обладают широким спектром поглощения и ярко выраженным узким пиком люминесценции в видимой части спектра. Они могут послужить альтернативой химическим флюо-

рохромам и улучшить качество медицинской диагностики. Детектирование света определенной длины волны позволит определить наличие в исследуемом образце возбудителей болезни.

Современные разработки нанотехнологий позволили получить новый класс флуоресцентных полупроводниковых нанокристаллов размером 2–6 нм. В зависимости от материала, используемого для нанокристаллов, и их размера можно получить спектральный диапазон излучения от 400 нм до 2 мкм. Полупроводниковые нанокристаллы различных размеров могут быть возбуждены лучом одной волны, а в результате получится гамма различных излучаемых цветов, которые могут быть обнаружены одновременно. Полупроводниковые наночастицы имеют более узкий в сравнении с традиционными флуорохромами спектр люминесценции, обладают гораздо лучшими свойствами поглощения и уменьшенными бликовыми эффектами. В результате наблюдается заметное увеличение яркости по сравнению с обычными химическими метками. Варианты применения люминесцентных наночастиц следующие: биовизуализация клеток и клеточных компонентов; маркировка и пространственный анализ *p*-гликопротеина (посредник фенотипа раковых клеток); молекулярная визуализация и диагностика единичных больных раковых клеток; локализация и количественные замеры цели на одиночной локализации опухоли с метастазами; определение биологически активных соединений от низкомолекулярных гормонов до вирусов и целых клеток; определение ДНК; многоканальное оптическое кодирование и высокоскоростной анализ генов и протеинов; нейрорхимическое наблюдение образцов.

Список литературы

1. **Curtis A., Wilkinson C., Trends B.** Semiconductor nanocrystals // *Biotechnology*. 2001. Vol. 19. P. 97–101.
2. **Яшин К. Д., Осипович В. С., Пицук С. Е.** Разработка физико-химических и технологических основ получения люминесцентных наночастиц из полупроводников // *Материалы научно-технической конференции "Медэлектроника"*. Минск. 2004. С. 153.
3. **Яшин К. Д., Алексейчук Л. И., Осипович В. С., Пицук С. Е.** Технические средства визуализации информации // Докл. БГУИР. Минск. 2005. № 5. 50 с.
4. **Яшин К. Д., Осипович В. С., Пицук С. Е.** Энергия поглощения CdSe // *Известия Белорусской инженерной академии*. Минск. 2005. № 1 (19)/5. 64 с.
5. **Яшин К. Д.** Разработка физико-химических и технологических основ получения люминесцентных наночастиц из полупроводников // *Отчет по НИР № ГР 2005756/К. Д. Яшин, В. С. Осипович, С. Е. Пицук*. Минск: УО "БГУИР". 2005. 60 с. Депонирован 07.04.06.
6. **Яшин К. Д., Осипович В. С., Пицук С. Е.** Водородная и квантово-механическая модели энергии поглощения CdSe // *Матер. IV Белорусско-Российской научно-технической конференции "Технические средства защиты информации"*. Минск. 2006. 78 с.
7. **Klein D. L., Alivisatos A. P., Colvin V. L., Schlamp M. C., Roth R., Lim A.** Light emitting diodes made from cadmium selenide nanocrystals and a semiconducting polymer // *Nature*. 1994. Vol. 370. 354 p.
8. **Schlamp M. C., Alivisatos A. P., Peng X.** Improved efficiencies in light emitting diodes made with CdSe(CdS) core/shell

type nanocrystals and a semiconducting polymer // *J. App. Phys.* 1997. Vol. 82. P. 5837.

9. www.qdots.com
10. **Coe S., Bawendi M. G.** et al. Electroluminescence from single monolayers of nanocrystals in molecular organic devices // *Nature*. 2002. Vol. 420. 800 p.
11. **Klimov V. I., Mikhailovsky A. A., Bawendi M. G.** et al. Optical gain and stimulated emission in nanocrystal quantum dots // *Science*. 2000. Vol. 290. 314 p.
12. **Pavesi L., Negro L. D., Mazzoleni C., Franzó G., Priolo F.** Optical gain in silicon nanocrystals // *Nature*. 2000. Vol. 408. 440 p.
13. **Eisler H.-J., Bawendi M. G., Klimov V. I., Sundar V. C.** et al. Color-selective semiconductor nanocrystal laser // *Appl. Phys. Lett.* 2002. Vol. 80. 4614 p.
14. **Huynh W. U., Alivisatos A. P., Dittmer J. J.** Hybrid nanorod-polymer solar cells // *Science*. 2002. Vol. 295. 2425 p.
15. **Кульбачинский В. А.** Полупроводниковые квантовые точки // *Соросовский образовательный журнал*. 1991. № 4. 98 с.
16. **Han M., Gao X., Su J. Z., Nie S.** Quantum dot tagged microbeads for multiplexed optical coding of biomolecules // *Nat. Biotech.* 2001. Vol. 19 (7). 631 p.
17. **Chan W. C. W., Nie S.** Quantum dot bioconjugates for ultrasensitive nonisotopic detection // *Science*. 1998. Vol. 281. 2016 p.
18. **Bruchez M., Alivisatos A. P., Moronne M., Gin P., Weiss S.** Semiconductor nanocrystals as fluorescent biological labels // *Science*. 1998. Vol. 281. 2013 p.
19. <http://www.qdots.com/new/applications/immuno.html>
20. **Dahan M., Alivisatos A. P., Pinaud F., Weiss S.** et al. Time-gated biological imaging by use of colloidal quantum dots // *Opt. Lett.* 2001. Vol. 26 (11). 825 p.
21. **Wu X., Bruchez M. P., Liu H., Liu J., Haley K. N., Treadway J. A., Larson J. P., Ge N., Peale F.** Immunofluorescent labelling of cancer marker and other cellular targets with semiconductor quantum dots // *Nature Biotechnology*. 2003. Vol. 21 (1). 41 p.
22. **Jovin T. M.** Quantum dots finally come of age // *Nature Biotechnology*. 2003. Vol. 21. 32 p.
23. <http://www.qdots.com/new/applications/blots.html>
24. **Gerion D., Alivisatos A. P., Parak W. J., Williams S. C.** et al. Sorting fluorescent nanocrystals with DNA // *J. Am. Chem. Soc.* 2002. Vol. 124. 7070 p.
25. <http://www.qdots.com/new/applications/arrays.html>
26. **Pathak S., Choi S. K.** et al. Hydroxylated quantum dots as luminescent probes for in situ hybridization // *J. Am. Chem. Soc.* 2001. Vol. 123. 4103 p.
27. <http://www.qdots.com/new/applications/fish.html>
28. <http://www.qdots.com/new/technology/dotcodes.html>
29. <http://www.qdots.com/new/technology/beadtech.html>
30. <http://www.qdots.com/new/technology/celltech.html>
31. **Jaiswal J. K., Mattoussi H.** et al. Long-term multiple color imaging of live cells using quantum dot bioconjugates // *Nature Biotechnology*. 2003. Vol. 21 (1). 47 p.
32. **Dahan M., Lévi S., Luccardini C.** et al. Diffusion dynamics of glycine receptors revealed by single-quantum dot tracking // *Science*. 2003. Vol. 302. 442 p.
33. **Dubertret B., Skourides P., Norris D. J.** et al. In vivo imaging of quantum dots encapsulated in phospholipid micelles // *Science*. 2002. Vol. 298. 1759 p.
34. **Goodwin J. W., Buscall R.** Quantum dots for medical imaging // *Boston: Academic*. 1995. 352 p.
35. **Larson D. R., Zipfel W. R., Bruchez M. P.** et al. Water-soluble quantum dots for multiphoton fluorescence imaging in vivo // *Science*. 2003. Vol. 300. 1434 p.
36. **Kim S., Bawendi M. G., Lim Y. T.** et al. Near-infrared fluorescent type II quantum dots for sentinel lymph node mapping // *Nat Biotech.* 2004. Vol. 22 (1). 93 p.
37. **Akerman M. E., Chan W. C. W., Laakkonen P., Bhatia S. N., Ruoslahti E.** Nanocrystal targeting in vivo // *PNAS*. 2002. Vol. 99 (20). P. 12617.
38. **Derfus A. M., Chan W. C. W., Bhatia S. N.** Probing the cytotoxicity of semiconductor quantum dots // *Nano Lett.* 2003. Vol. 4 (1). 11 p.
39. **Nanoscience and nanotechnologies: opportunities and uncertainties.** London: The Royal Society and the Royal Academy of Engineering, 2004.
40. **Артемьев М. В., Захарченко К. В.** и др. Люминофоры на основе наночастиц CdSe/ZnS для задач дактилоскопии // *Матер. научно-техн. конф. "Применение наноматериалов на практике"*. Москва. 2005. 250 с.

Наночастицы заранее расскажут о надвигающемся атеросклерозе

Тайваньские ученые разработали новый метод ранней диагностики заболевания гиперхолестеремии. Технология, основанная на использовании магнитных наночастиц показала хорошие результаты диагностики на кроликах.

Заболевание гиперхолестеремия заключается в появлении чрезмерно большого количества холестерина в тканях и плазме крови. Как следствие, эта болезнь приводит к атеросклерозу, при котором происходит закупорка артерий холестериновыми бляшками.

Заболевание на начальной стадии обнаружить достаточно трудно, поскольку холестериновые бляшки явно не выражены, а само вещество находится в крови в растворенном виде.

Как сообщает Nanotechweb, сегодня существует способ обнаружить повышенное содержание холестерина в тканях и крови и начало закупорки сосудов — магнитокардиография с помощью сверхчувствительного аппарата SQUID — сверхпроводящего устройства квантовой интерферен-

ции. SQUID позволяет отслеживать магнитную активность человеческого сердца. После обследования ученые получают карту магнитных полей (рис. 1), на которой можно установить аномальные электрические сигналы, связанные с неполной закупоркой артерий. Но, опять-таки, до сих пор было практически невозможно определить содержание в крови высокого уровня холестерина без закупорки сосудов.

Однако тайваньским ученым Гон-Чанг Янгу (Hong-Chang Yang) и его коллегам из Национального Тайваньского университета (National Taiwan Normal University) и других исследовательских центров (Taiwan University Hospital и Korea Research Institute of Standards and Science) в Тайпее удалось значительно усовершенствовать аппарат SQUID, использовав для этого новый тип магнитной жидкости. Основа жидкости — наночастицы размером 50 нм, состоящие из железного "ядра", покрытого декстраном (рис. 2).

Подопытному кролику с высоким содержанием холестерина в крови перед SQUID-сканированием было введено 2 мл раствора наночастиц.

Результаты диагностики показали, что карта сердца "заболевшего" кролика отличается от нормальной. Так, специфический сигнал, отображающий пики нарастания магнитного поля ΔB , в нормальном организме спадает, в то время как у кролика с повышенным содержанием холестерина ΔB нарастает.

Механизм явления пока не изучен, но это не мешает использовать SQUID совместно с магнитным раствором для ранней диагностики болезни.

Сперва ученые планируют провести ряд клинических тестов, после чего уверены в успешном медицинском применении нового метода.

Источник: Nanotechweb: Nanoparticles detect high cholesterol (<http://nanotechweb.org/articles/news/6/2/11/1>)



Рис. 1. Аппарат SQUID составляет магнитную карту сердца (Hong-Chang Yang)

Лаборатории-на-чипе обзаведутся пузырьковыми компьютерами

Ученые из Массачусетского Технологического института (MIT) представили первое в мире вычислительно-логическое устройство, работающее на микроскопических пузырьках воздуха (рис. 3). "Эта работа может существенно изменить вычислительные способности систем лаборатория-на-чипе (lab-on-chip)", — говорит один из исследователей Нейл Гершенфельд (Neil Gershenfeld).

Как сообщает PhysOrg, команда исследователей из Center for Bits and Atoms установила, что микрожидкостная система с пузырьками воздуха может проводить такие же вычисления, что и тра-

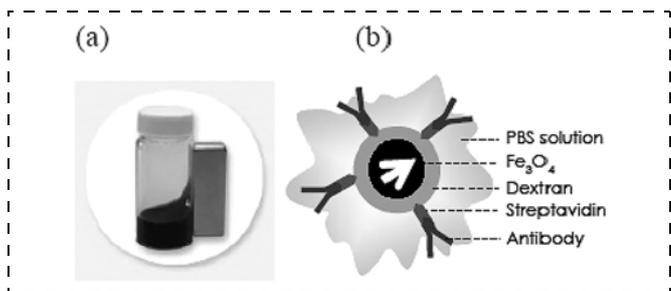


Рис. 2. Наночастицы железа — основа магнитной жидкости (Hong-Chang Yang)

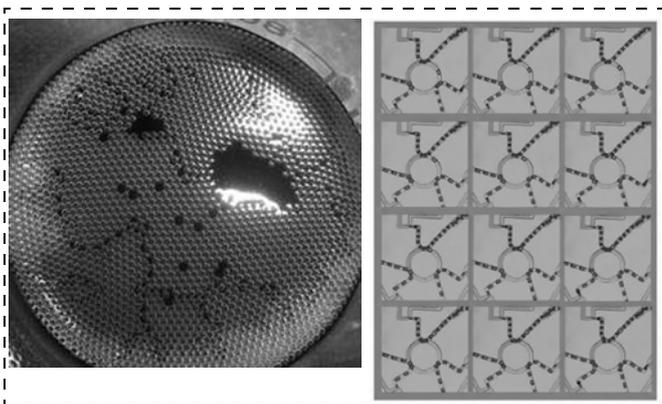


Рис. 3. Схема работы лаборатории-на-чипе с пузырьковым компьютером

диционные электронные компьютеры, проводя при этом химические реакции.

"Пузырьковая логика связывает химию с компьютерными вычислениями, позволяя присоединять к биту еще и химическое соединение, — говорит Нейл. — Так появляется возможность управлять химическими реакциями и следить за их протеканием".

Технология лаборатории-на-чипе развивается достаточно давно, поэтому ученым достаточно важно обеспечить контроль за химическими соединениями при экспресс-анализе.

Микрожидкостные чипы теперь ученые могут контролировать с помощью взаимодействий пузырьков, что уже само по себе не требует управления чипами "извне". Нейл говорит, что пузырькам можно задать программу, как в самом настоящем компьютере, и на основании этой программы пузырьки-биты будут управлять химическими реакциями. Сам чип смотрит на присутствие или отсутствие пузырька воздуха по изменению напряжения между электродами, через которые проходит исследуемый раствор.

Конечно, скорость работы такого компьютера в 1000 раз медленнее современных микропроцессоров. Зато в 100 раз быстрее логики на механических вентилях.

Но и это далеко не все достижения ученых. Так, с помощью пузырьков можно сконструировать "химическую память", содержащую сотни реагентов в лаборатории-на-чипе.

Другие задачи пузырькового компьютера охватывают сортировку отдельных клеток при исследовании биологических образцов.

Источник: PhysOrg: Flow of tiny bubbles mimics computer circuitry (<http://www.phvsorg.com/news90167885.html>)

Опреснитель из нанотрубок: первый шаг сделан

Углеродные нанотрубки — отличные мембраны, пропускающие воду. Недавно ученым удалось

управлять с высокой степенью точности протоком воды через мембрану. Как сообщает EurekAlert, исследователи из Политехнического Института Ренсслеера (Rensselaer Polytechnic Institute) разработали систему фильтрации воды с помощью нанотрубок, позволяющую практически мгновенно опреснять морскую воду. Кроме того, наночистый фильтр будет полезен для мгновенной сортировки участков ДНК в биологических тестах.

Основа метода — использование нанотрубчатых мембран в качестве селективного элемента. Однако углеродные нанотрубки гидрофобны, поэтому до сих пор ученым не удавалось пропустить через них воду и, тем более, создать работоспособный фильтр на их основе.

"Хотя эта проблема давно известна, нам удалось решить ее на фундаментальном уровне, — говорит профессор Никил Кораткар (Nikhil Koratkar). — Мы изучили электрохимию процесса взаимодействия воды с поверхностью нанотрубки и установили, как можно добиться протекания воды через эту наноструктуру".

Оказалось, что подача на нанотрубку определенного низкого потенциала заставляет воду просачиваться через стенки нанотрубок. При этом ученые могут с небывалой точностью контролировать этот процесс, изменяя напряжение.

"Не секрет, что одним из главных вопросов человечества, которые встанут перед ним в будущем, будет добыча чистой пресной воды, — продолжает Никил. — Если же мы сможем эффективно опреснять морскую воду, то проблема будет решена. Я считаю, что своим открытием мы сделали первый шаг к решению этой проблемы. Следующим шагом мы постараемся сортировать с помощью нанотрубок молекулы протеинов и ДНК, для того чтобы улучшить современные ДНК-анализаторы".

Процесс работы наночистого фильтра очень прост: вода заряжается до отрицательного потенциала в $-1,7$ В, в то время как углеродной нанотрубке сообщается эквивалентный положительный потенциал. После этого нанотрубка "переключается" из гидрофобного "режима" в гидрофильный "режим", пропуская через себя воду. Однако если ученые заряжали отрицательно нанотрубку, а воду — положительно, то для протока требовался серьезный потенциал — около 90 В.

В основе этого процесса лежит электрохимическое окисление нанотрубки, благодаря которому она и становится гидрофильной.

Теперь же ученые планируют сделать прототип нанотрубчатого фильтра, позволяющего отделять органику и соли от чистой воды.

Источник: EurekAlert: Controlling the movement of water through nanotube membranes (<http://www.eurekalert.org/pub-releases/2007-02/rpi-ctm021307.php>)

Одноатомный резонатор взвесит молекулу

Физики из США создали самый маленький в мире резонатор на основе графеновой пленки (рис. 4) — самого тонкого материала в мире.

Графен — это "двумерная пленка" из атомов углерода, или, если представить наглядно, то нанотрубка, разрезанная вдоль оси и раскатанная на плоскости, тоже будет графеном.

Впервые наноматериал графен был синтезирован в 2004 г. профессором Эндрю Геймом. Тогда же ученые установили, что по электропроводности он не уступает углеродным нанотрубкам и, в перспективе, может заменить нанотранзисторы на их основе.

Как сообщает Nanotechweb, графен является уникальным материалом для исследования свойств так называемых "двумерных электронов", т. е. электронов, "привязанных" к структурным особенностям этого материала толщиной в один атом.

Теперь же команде исследователей из Корнельского Университета (Cornell University) удалось заставить работать двумерную графитовую пленку в качестве наноэлектронного устройства.

Пол МакЮн (Paul McEuen) и его коллеги смогли разместить слой графена длиной несколько микрометров между двумя кремниевыми "зажимами", получив резонатор толщиной в атом углерода. Ученые сделали несколько резонаторов с графеновой полосой различной толщины (толщина менялась путем увеличения числа слоев материала). При этом ее толщина изменялась от 1 до 50 нм.

Далее исследователи воздействовали на полоску пульсирующим лазером и добились работы резонатора на частотах от 1 до 170 МГц. Разбег в частотах обуславливался толщиной графеновой пленки и числом ее слоев.

Также Пол прикладывал к пленке переменное напряжение и наблюдал колебания пленки. Это было заметно по неравномерному отражению лазерного излучения от поверхности пленки.

Как говорит Мак Юн, столь малая масса графенового резонатора-пленки может позволить

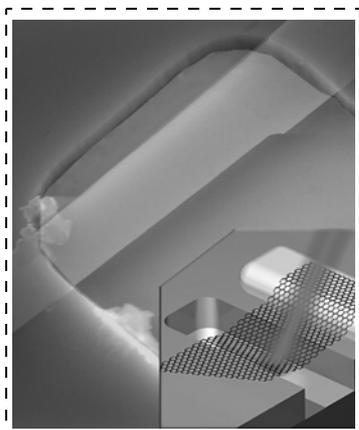


Рис. 4. Графеновый резонатор (Cornell University)

использовать его в качестве детектора массы, причем с его помощью можно будет взвешивать с высокой точностью отдельные молекулы.

Графеновый резонатор может выступать также в качестве сверхточного детектора силы, поскольку практически не вибрирует после снятия напряжения, что обуславливает его высокую точность.

Ученые уверены, что новый наноматериал только начинает открывать свои уникальные возможности в наноэлектронике, поэтому они собираются продолжать свои исследования для того, чтобы сделать первый графеновый масс-детектор.

Источник: Nanotechweb: Graphene resonator is one atom thick (<http://nanotechweb.org/articles/news/6/1/18/1>)

Наночастицы-извозчики

Исследователи из Кореи разработали простой способ производства полимерных нанокапсул, которые можно использовать для доставки лекарств в медицине.

Как сообщает Nanotechweb, новый метод позволяет получать полые нанокапсулы без заранее подготовленных шаблонов, а это значительно уменьшает время их производства.

Доктор Кимун Ким (Kimoon Kim) из Университета науки и технологии Пэиханга (Pohang University of Science and Technology) предложил для производства наносфер использовать набор молекул в форме диска с углублением в центре (рис. 5). Молекулы-мономеры назвали "curcurbiturils" из-за их сходства с пустотелой тыквой (curcurbiticeae). На поверхности молекул находятся "крючки", которыми диски соединяются друг с другом под воздействием ультрафиолетового излучения.

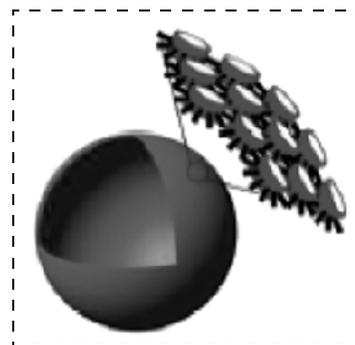


Рис. 5. Схема "сборки" наночастицы (Pohang University of Science and Technology)

В итоге, шарообразная нанокапсула собирается из частей, как головоломка. Контролируя процесс с помощью излучения, ученым удалось получить пустотелые нанокапсулы диаметром от 150 до 600 нм.

Для того чтобы продемонстрировать пригодность нанокапсул для медицинского использования в области доставки лекарств, Кимун нанес на поверхность капсулы различные биомолекулы, которые разместились в полостях молекулярных дисков, образующих капсулу.

Как говорят ученые, капсулу можно "сориентировать" на распознавание только раковых клеток, чтобы более эффективно проводить химиотерапию.

Источник: Nanotechweb: Nanocapsules target tumors (<http://nanotechweb.org/articles/news/6/2/7/1>)

Ученые установили, почему наноструны нарушают законы физики

Ученые определили, как изменяются электропроводные свойства металлических нанострун в зависимости от их длины.

Как установили физики из Технического института Джорджии (Georgia Tech), 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 (рис. 6). Так, если в ниобиевых нанострунах димеры расположены по центру, то их электропроводность больше, чем у нанострун, в которых димеры находятся сбоку.

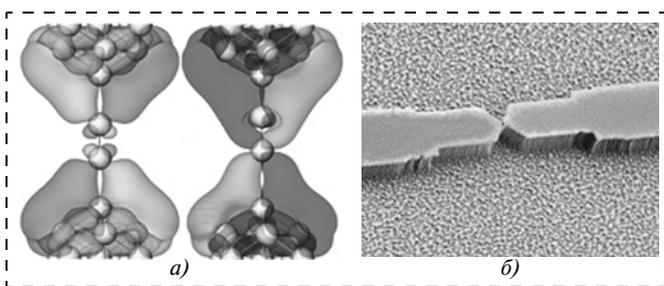


Рис. 6. Модель ниобиевых нанострун с различным расположением димеров (а) и сама наноструна (б)

Экспериментальные данные подтвердились квантовомеханической моделью, которые 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 различается (хотя теоретически не должна), уже не удивляет исследователей.

Хотя пока не видны области практического применения этого открытия, 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>)

Ученые создали молекулу-"зашелку"

Миниатюрную молекулярную зашелку смогли создать ученые из Weizmann Institute of Science, США.

Обычно мы пользуемся различными зашелками — устройствами, которые открываются, если выполнить над ними какое-либо действие: нажать на язычок зашелки, ввести правильный пароль или же использовать нужный ключ.

Профессору Абрахаму Шанцеру (Abraham Shanzer) удалось сделать еще одну версию зашелки — молекулу, которая состоит из двух флуоресцентных частей, разделенных между собой мостиком, способным связывать атомы железа.

Как сообщает EurekAlert, флуоресцентные участки светятся только при наличии в окружающей среде определенных условий, а именно: ионов железа, ультрафиолета, кислот и оснований. Только когда такая комбинация появится в окружающей "защелку" среде, ее флуоресцентные части излучают зеленый и синий свет.

"Защелка" срабатывает только при совпадении всех "условий". Теперь же Шанцер и его коллеги пытаются создать молекулу, которая была бы "кодовым замком", т. е. распознавала последовательности сигналов, поступающих от окружающей среды. И, если это ионы железа—щелочь—кислота (1—2—3), а не кислота—щелочь—ионы железа (3—2—1), то она должна сработать в первом случае и не сработать во втором.

Ученые уверены, что на основе молекулярных зашелок им удастся создать новый тип молекулярной логики.

Источник: EurekAlert: Weizmann Institute scientists develop the first molecular keypad lock (http://www.eurekalert.org/pub_releases/2007-01/acft-wis012407.php)

Нанотрава "осветит" LED дисплей

Ранее мы уже сообщали о светящихся нанонитях из оксида цинка, которые вырастили ученые из Национального института стандартов и технологий США (NIST). Теперь же исследователи нашли им практическое применение — в качестве фотоэмиттеров LED.

Эти нанонити были выращены из сплава полупроводника нитрида галлия в высоком вакууме с присутствием катализаторов методом послойного нанесения атомов.

Эти уникальные структуры характеризуются высокой гибкостью, несмотря на то, что представляют собой кристаллы. В этот раз ученые из NIST заинтересовались их люминесцентными свойствами — они испускают ультрафиолет и световые волны из некоторых видимых частей спектра под воздействием лазерного излучения или слабого электрического тока.

Как оказалось, длина волны света напрямую зависит от состава сплава. Исследователям удалось создать светящийся "ковер" со средним диаметром одной нити 200 нм и длиной до 12 мкм.

Оксид цинка — отличный фотоэмиттер с шириной запрещенной энергетической зоны 3.37 эВ. Однако создать материалы на основе оксида цинка с *p*-допированием для их использования в све-

то выпускающих электронных приборах было довольно трудно.

Но эти трудности были преодолены, и первый ZnO LED от компании MOXtronics появился несколько месяцев назад. Его особенность состоит в том, что он может излучать свет в диапазоне от ультрафиолета до видимого спектра.

Благодаря новому методу допирования ZnO нанонитями фосфором в камере парового осаждения (chemical vapor deposition — CVD) ученые смогли получить нанонити ZnO *p*-типа.

Как говорят ученые, новый метод даже дешевле, чем производство GaN полупроводников, используемых в LED панелях по технологии металлоорганического осаждения в паровой фазе (metal—organic chemical vapor deposition — MOCVD).

По внешнему виду нанонити похожи на "пучки травы" (рис. 7), а эта геометрия как нельзя кстати подходит для построения на их основе LED дисплеев.

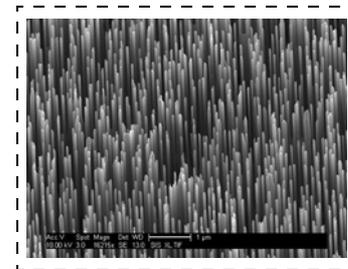


Рис. 7. ZnO нанонити (NIST)

Пока представители компании MOXtronics и ученые не дают информации о том, когда новинки появятся на мировом рынке, но учитывая современные темпы развития LED и LCD дисплеев, коммерциализация этой технологии не займет много времени.

Источник: Optics: ZnO nanowires promise more efficient LEDs (http://optics.org/cws/Articles/ViewArticle.do?sessionId=6F1D6F9A82F0B30BA77DD89469B_CB0FB?channel=technology&articleId=26830).

Составил Ю. Свидиненко

CONTENTS

Bocharov L. Yu., Malcev P. P. <i>The Main Directions Development and Future of Quantum Information Technologies.</i>	2
Bobkov S. G., Kireev V. Yu. <i>Transition Problems of Microelectronics into SUB-100 nm Region Feature Size. Part 1. The General State of Affairs and Possibilities Lithographic and not Lithographic Methods for Patterning.</i>	11
Obukhov I. A. <i>Selfcooling of the Quantum Wire's Emitter Contact.</i>	21
Sherstnev P. V., Sheshin E. P., Chuprik A. A. <i>Calculation Cantilever's Work Function Based on the AFM Investigations of Binary Composition Cu—Cr.</i>	24
Guschin O. P., Danilkin E. V., Paderin A. Yu. <i>Methods of Grooves Formation in Making Technologies of Slitting DMOS-Transistors.</i>	26
Bobrinetskii I. I., Nevolin V. K., Simunin M. M. <i>Effect of Adsorption of Alcohol Vapours on the Conductance of Carbon Nanotube Structures.</i>	29
Volkov G. M. <i>Nanocomposition of System "Carbon—Carbon". Bioengineering and Mechanical Engineering Potential.</i>	34
Gridchin A. V., Kolchuzhin A. V., Gridchin V. A., Gerlach U. G. <i>Investigation of Four-Terminal Piezosensitive Structures with the Aid of Finite-Element Modeling.</i>	38
Lubimsky V. M. <i>Bending of Circular and Rectangular Diaphragms under Joint Action of Electrostatic Attraction and Lateral Loading.</i>	43
Ushkov A. V., Kozlov A. N. <i>Designing, Manufacture and Research of Silicone Sensitive Pressure Elements with Protection from Overloads.</i>	49
Mukhurov N. I., Efremov G. I. <i>The Analysis of Correlation of Electromechanical Characteristics of Electrostatic Torsion Microsystems.</i>	52
Gornev E. S., Daineko A. V., Zaitcev N. A., Pastukhova Yu. M. <i>Investigation and Development of Microvacuum Triode with Field Emission Cold Cathode.</i>	59
Koleshko V. M., Chashinski A. S., Khmurovich N. V. <i>Sensory Molecular Containers.</i>	63
Timoshenkov S. P., Zotov S. A., Kalugin V. V., Balychev V. N., Morozova E. S. <i>Development of Microdrive for Control of Micromirror.</i>	66
Yashin K. D., Osipovich V. S., Pitsuk S. E. <i>Luminescent Semiconductor Nanoparticles.</i>	70

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 19.03.2007. Подписано в печать 23.03.2007. Формат 60×88 1/8. Бумага офсетная. Печать офсетная.
Усл. печ. л. 9,8. Уч.-изд. л. 11,98. Заказ 540. Цена договорная

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



АТОМЭКСПО (атомная энергетика); **ИНТЕРДРАЙВ** (гидравлика, пневматика, приводы и их элементы); **ИНТЕРМАТИК** (электроника и связь в промышленности); **ИНТЕРТЕХСАЛОН** (автоматизация в промышленности и информационные технологии, промышленные роботы и интеллектуальные системы); **КОНВЕЙЕРЫ** (машины непрерывного транспорта); **НАНОТЕХЭКСПО** (нанотехнологии и наноматериалы); **ПРОМЫШЛЕННАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ** (промышленная безопасность и охрана труда); **СУБКОНТРАКТИНГ И АУТСОРСИНГ** (промышленная кооперация и интеграция, компоненты и материалы); **ЭНЕРГОТЕХ** (оборудование и технологии производства, передачи, преобразования и распределения электрической и тепловой энергии); **ЭТАЛОН** (испытательное и измерительное оборудование).

Дирекция: 129223, Москва, а/я 10, Телефон/факс: (495) 937-40-81, E-mail: miif@miif.ru www.miif.ru