TAIO- & MIKPOCICIEMIAA

Издается с 1999 г.

ЕЖЕМЕСЯЧНЫЙ МЕЖДИСЦИПЛИНАРНЫЙ ТЕОРЕТИЧЕСКИЙ И ПРИКЛАДНОЙ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ

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

Журнал включен в перечень научных и научно-технических изданий ВАК России и в системы цитирования РИНЦ и Scopus

Главный редактор

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

Лучинин В. В., д.т.н, проф.

Шур М., д.ф.-м.н., проф. (США)

Редакционный совет:

Аристов В. В., д.ф.-м.н., проф., чл.-кор. РАН Асеев А. Л., д.ф.-м.н., проф., акад. РАН Гапонов С. В., д.ф.-м.н., проф., акад. РАН Каляев И. А., д.т.н., проф., чл.-кор. РАН Квардаков В. В., д.ф.-м.н., проф., чл.-кор. РАН Климов Д. М., д.т.н., проф., чл.-кор. РАН Ковальчук М. В., д.ф.-м.н., проф., чл.-кор. РАН Нарайкин О. С., д.т.н., проф., чл.-кор. РАН Никитов С. А., д.ф.-м.н., проф., чл.-кор. РАН Рыжий В. И., д.ф.-м.н., проф., чл.-кор. РАН (Япония) Сауров А. Н., д.т.н., проф., чл.-кор. РАН Сигов А. С., д.ф.-м.н., проф., акад. РАН Шевченко В. Я., д.х.н., проф., акад. РАН **Редакционная коллегия:** Абрамов И. И., д.ф.-м.н., проф. (Беларусь)

Андреев А., к.ф.-м.н., (Великобритания) Андриевский Р. А., д.х.н., проф. Антонов Б. И. Астахов М. В., д.х.н., проф. Быков В. А., д.т.н., проф. Волчихин В. И., д.т.н., проф. Горнев Е. С., д.т.н., проф. Градецкий В. Г., д.т.н., проф. Кальнов В. А., к.т.н. Карякин А. А., д.х.н., проф. Колобов Ю. Р., д.т.н., проф. Кузин А. Ю., д.т.н., проф. Мокров Е. А., д.т.н. Панич А. Е., д.т.н., проф. Панфилов Ю. В., д.т.н., проф. Петросянц К. О., д.т.н., проф. Петрунин В. Ф., д.ф.-м.н., проф. Пожела К., д.ф.-м.н. (Литва) Путилов А. В., д.т.н., проф. Пятышев Е. Н., к.ф.-м.н. Стриханов М. Н., д.ф.-м.н., проф. Телец В. А., д.т.н., проф. Тимошенков С. П., д.т.н., проф. Тодуа П. А., д.т.н., проф. Шубарев В. А., д.т.н., проф. Отв. секретарь Лысенко А. В. Редакция: Григорин-Рябова Е. В. Чугунова А. В. Учредитель: Издательство "Новые технологии"

СОДЕРЖАНИЕ _

МАТЕРИАЛОВЕЛЧЕСКИЕ И ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ МНСТ

I I	Бабаевский П. Г., Жукова С. А., Обижаев Д. Ю., Гринькин Е. А., Турков В. Е., Резниченко Г. М., Рискин Д. Д., Бычкова Ю. А. Вакуумплотное матричное корпусирование сенсорных микроэлектромеханических систем (аналитиче- ский обзор). Часть 2. Формирование вакуумплотных электрических выво- дов, способы сохранения и контроля вакуума в рабочих полостях и общие тенденции развития технологии корпусирования с МЭМС
H H H	Брехов К. А., Лавров С. Д., Афанасьев М. С., Шерстюк Н. Э., Мишина Е. Д., Кимель А. В. Линейный электрооптический эффект в пленках BST: расчет коэффициента Керра
H	Фрицлер К. Б., Селезнев В. А., Принц В. Я. Микро- и наноструктуриро- ванные геккон-адгезивы: формирование и практические применения 14
H	Демин Г. Д., Дюжев Н. А., Попков А. Ф., Чиненков М. Ю. Спин-поляри- зованная токовая эмиссия в вакуум и переключение магнитного состояния тонких наноостровковых пленок
	Заярский Д. А., Невешкин А. А., Байбурин В. Б., Слаповская Ю. П. Создание многослойных структур на основе Alq ₃ и исследование их свойств 30
	МОДЕЛИРОВАНИЕ И КОНСТРУИРОВАНИЕ МНСТ
	Винокуров Д. Л. Численное моделирование магнитной структуры компен- сированной границы раздела ферромагнетик-мультиферроик
	Маркелов А. С., Трушин В. Н., Чупрунов Е. В. Исследование возможности формирования пространственной структуры рентгеновских пучков с использованием легированных кристаллов
	ЭЛЕМЕНТЫ МНСТ
	Годовицын П. В., Генералов С. С., Поломошнов С. А., Сывороткин П. А., Амеличев В. В. Интегральный конденсаторный преобразователь акустиче- ского давления для миниатюрного МЭМС-микрофона
	СИСТЕМА-НА-КРИСТАЛЛЕ
	Вишнеков А. В., Ерохин В. В. Проектирование систем-на-кристалле: выбор базовой технологии изготовления кристалла
	Аннотации на русском и английском языках с 1999 г. по настоящее время находятся в свободном доступе на сайте журнала (http://microsystems.ru; http://novtex.ru/nmst/) и научной электронной библиотеки (http://elibrary.ru). Электронные версии полнотекстовых статей расположены на сайте журнала: с 1999 по 2011 г. в разделе "АРХИВ".

ПОДПИСКА:

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

© Издательство "Новые технологии", "Нано- и микросистемная техника", 2014

INTERDISCIPLINARY, SCIENTIFIC, TECHNIQUE AND PRODUCTION JOURNAL

Journal of NANOand MICROSYSTEM TECHNIQUE

NANO- I MIKROSISTEMNAYA TEHNIKA

Nº 4 (165) 2014

Maltsev P. P., Dr. Sci. (Tech.), Prof. – EDITOR IN CHIEF Luchinin V. V., Dr. Sci. (Tech.), Prof. DEPUTY OF EDITOR IN CHIEF Shur M. S., Dr. Sci. (Phys.-Math.), Prof. (USA) – DEPUTY OF EDITOR IN CHIEF

Editorial council:

Aristov V. V., Dr. Sci. (Phys.-Math.), Prof., Cor.-Mem. RAS Aseev A. L., Dr. Sci. (Phys.-Math.), Prof., Acad. RAS Chaplygin Ju. A., Dr. Sci. (Tech.), Prof., Cor.-Mem. RAS Gaponov S. V., Dr. Sci. (Tech.), Prof., Cor.-Mem. RAS Kaljaev I. A., Dr. Sci. (Tech.), Prof., Cor.-Mem. RAS Klimov D. M., Dr. Sci. (Tech.), Prof., Acad. RAS Kovalchuk M. V., Dr. Sci. (Phys.-Math.), Prof., Cor.-Mem. RAS Kvardakov V. V., Dr. Sci. (Phys.-Math.), Prof., Cor.-Mem. RAS Narajkin O. S., Dr. Sci. (Tech.), Prof., Cor.-Mem. RAS Nikitov S. A., Dr. Sci. (Phys.-Math.), Prof., Cor.-Mem. RAS Svardakov V. I. (Japan), Dr. Sci. (Phys.-Math.), Prof., Cor.-Mem. RAS Saurov A. N., Dr. Sci. (Tech.), Prof., Cor.-Mem. RAS Shevchenko V. Ya., Dr. Sci. (Chem.), Prof., Acad. RAS

Sigov A. S., Dr. Sci. (Phys.-Math.), Prof., Acad. RAS

Editorial board:

Abramov I. I. (Belorussia), Dr. Sci. (Phys.-Math.), Prof. Andreev A. (UK), Cand. Sci. (Phys.-Math.), Prof. Andrievskii R. A., Dr. Sci. (Chem.), Prof. Antonov B. I. Astahov M. V., Dr. Sci. (Chem.), Prof. Bykov V. A., Dr. Sci. (Tech.), Prof. Gornev E. S., Dr. Sci. (Tech.), Prof. Gradetskiy V. G., Dr. Sci. (Tech.), Prof. Kalnov V. A., Cand. Sci. (Tech.) Karjakin A. A., Dr. Sci. (Chem.), Prof. Kolobov Ju. R., Dr. Sci. (Tech.), Prof. Kuzin A. U., Dr. Sci. (Tech.), Prof. Mokrov E. A., Dr. Sci. (Tech.) Panfilov Ju. V., Dr. Sci. (Tech.), Prof. Panich A. E., Dr. Sci. (Tech.), Prof. Petrosjants C. O., Dr. Sci. (Tech.), Prof. Petrunin V. F., Dr. Sci. (Phys.-Math.), Prof. Piatishev E. N., Cand. Sci. (Phys.-Math.), Prof. Pozhela K.(Lithuania), Dr. Sci. (Phys.-Math.) Putilov A. V., Dr. Sci. (Tech.), Prof. Strikhanov M. N., Dr. Sci. (Phys.-Math.), Prof. Shubarev V. A., Dr. Sci. (Tech.), Prof. Telets V. A., Dr. Sci. (Tech.), Prof. Timoshenkov S. P., Dr. Sci. (Tech.), Prof. Todua P. A., Dr. Sci. (Tech.), Prof. Volchihin V. I., Dr. Sci. (Tech.), Prof.

Executive secretary:

Lysenko A. V.

Editorial staff:

Chugunova A. V. Grigorin-Ryabova E. V. Published since November 1999 ISSN 1813-8586

CONTENTS

SCIENCE OF MATERIALS AND TECHNOLOGICAL BASICS OF MNST

Fritzler K. B., Seleznev V. A., Prinz V. Ya. Micro- and Nanostructured Gecko-Inspired Adhesives: Fabrication and Applications . 14

MODELLING AND DESIGNING OF MNST

MICRO- AND NANOSYSTEM TECHNIQUE ELEMENTS

SISTEMS-ON-CHIP

Материаловедческие и технологические основы MHCT Science of materials and technological basics of MNST

УДК 531.76

П. Г. Бабаевский², д-р техн. наук, проф., зав. каф., **С. А. Жукова**¹, канд. техн. наук, нач. комплекса,

Д. Ю. Обижаев¹, канд. техн. наук, зам. нач. отд., Е. А. Гринькин¹, канд. техн. наук, нач. лаб.,

В. Е. Турков¹, канд. физ.-мат. наук, нач. центра, **Г. М. Резниченко**², канд. техн. наук, доц.,

Д. Д. Рискин¹, вед. инж., Ю. А. Бычкова¹, инженер

¹ Государственный научный центр Российской Федерации ФГУП "Центральный научно-исследовательский институт химии и механики" имени Д. И. Менделеева, г. Москва

² Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования "МАТИ — Российский государственный технологический университет имени К. Э. Циолковского", г. Москва

ВАКУУМПЛОТНОЕ МАТРИЧНОЕ КОРПУСИРОВАНИЕ СЕНСОРНЫХ МИКРОЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИХ СИСТЕМ (АНАЛИТИЧЕСКИЙ ОБЗОР).

ЧАСТЬ 2*. ФОРМИРОВАНИЕ ВАКУУМПЛОТНЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ВЫВОДОВ, СПОСОБЫ СОХРАНЕНИЯ И КОНТРОЛЯ ВАКУУМА В РАБОЧИХ ПОЛОСТЯХ И ОБЩИЕ ТЕНДЕНЦИИ РАЗВИТИЯ ТЕХНОЛОГИИ КОРПУСИРОВАНИЯ С МЭМС

Поступила в редакцию 28.11.2013

Часть 2 обзора посвящена методам и проблемам формирования вакуумплотных электрических выводов к контактным площадкам, сохранения и контроля вакуума в рабочих полостях МЭМС, а также общим тенденциям развития технологии корпусирования сенсорных МЭМС, направленным на уменьшение размеров корпусов за счет использования новых материалов и процессов для соединения пластин, а также на компьютеризацию моделирования, проектирования, производства, испытания и оценки надежности и жизнеспособности С МЭМС в единой системе обеспечения их жизненного цикла.

Ключевые слова: сенсорные МЭМС, чувствительные элементы, корпусирование на уровне пластин, тонкослойное капсулирование, электрические выводы, контакты, межсоединения, соединительные слои, газопоглотители, мембранные сенсоры, сенсоры Пирани, балочные резонаторы

P. G. Babayevsky, S. A. Zhukova, D. Yu. Obizhaev, E. A. Grinkin, V. E. Turkov, G. M. Reznichenko, D. D. Riskin, Yu. A. Bychkova

MEMS SENSOR VACUUM WAFER LEVEL PACKAGING (ANALYTICAL REVIEW). PART 2. VACUUM-TIGHT ELECTRICAL INTERCONNECTION FORMARION, PRACTICE OF VACUUM PRESERVATION AND CONTROL IN WORKING CAVITIES AND GENERAL TENDENCIES OF DEVELOPMENT OF MEMS SENSOR VACUUM WAFER LEVEL PACKAGING

The second part of the review contains the state-of-the-art analysis of methods and problems of electric leads, contacts and interconnections formations at various connecting layers, practice of vacuum preservation and control in working cavities, and general tendencies of MEMS packaging technology development, directed on reduction of the sizes of caps thanks to new materials, bonding processes, as well as computerization of modeling, design, production, test and reliability and viability assessment.

Keywords: MEMS sensors, sensitive elements, wafer level packaging, thin film encapsulation, electric leads, contacts, interconnections, connecting layers, getters, membrane sensors, Pirani sensors, beam resonators

^{*} Часть 1 опубликована в № 3, 2014 г.

Введение

Наряду с соединением и разрезанием пластин важнейшую роль в реализации и обеспечении эффективности вакуумплотного матричного корпусирования сенсорных МЭМС (С МЭМС) играют способы формирования вакуумплотных электрических выводов к контактным площадкам при использовании токопроводящих и непроводящих (диэлектрических) соединительных слоев, а также поддержания и контроля вакуума в рабочих полостях таких устройств [1—11]. Поэтому основной целью данной части работы является обобщенный анализ этих способов и возникающих проблем, а также рассмотрение общих тенденций развития технологий корпусирования С МЭМС.

1. Формирование вакуумплотных электрических выводов

Формирование электрических выводов при токопроводящем соединительном слое. На рис. 1 (см. четвертую сторону обложки) схематически показаны варианты формирования сквозных выводов к контактным площадкам в С МЭМС токопроводящим соединительным слоем между крышкой и рабочей основой, или подложкой через верхнюю и нижнюю пластины (крышку и подложку соответственно) и через соединительный слой (сбоку).

В первой схеме (рис. 1, *a*, см. четвертую сторону обложки) возможно использование одного и того же токопроводящего материала для соединения пластин и формирования выводов, причем эти процессы разделены с формированием МЭМ ЧЭ и не ограничивают его температурный режим. В этом случае в качестве крышки может быть использована пластина КМОП. Во второй схеме (рис. 1, δ) для соединения пластин и формирования выводов могут быть использованы различные металлы, что позволяет оптимизировать оба процесса. В обеих

схемах (рис. 1, а, б) формирование сквозных отверстий в подложке С МЭМС накладывает определенные температурные ограничения на процессы формирования МЭМ ЧЭ. В третьей схеме (рис. 1, в) не требуется формирование сквозных отверстий в подложке или крышке, требуется только нанесение изолирующего слоя между выводом и соединительным слоями, причем в качестве вывода может быть использован дополнительно нанесенный проводящий слой или допированный слой кремниевой подложки С МЭМС. При этом сборку затрудняет ступенчатая топография С МЭМС.

На рис. 2 показан пример формирования цилиндрических сквоз-



Рис. 2. Схема формирования цилиндрических сквозных выводов через подложку С МЭМС, корпусированную сращиванием пластин [1]

ных выводов через подложку С МЭМС, соединенную с крышкой эвтектическим сплавом.

Примеры разработанных фирмой *ePak* методов формирования электрических выводов сбоку через соединительный слой из эвтектического сплава (*Lateral Feedthrough, LFT*) и вертикально через крышку (*Vertical Feedthrough, VFT*) приведены на рис. 3. В первом методе выводы формируются слоями металла, а во втором — вертикальными токопроводящими столбиками сильно допированного кремния и слоями металла. Основными преимуществами второго метода являются отличная электроизоляция и отсутствие диэлектрических потерь, а также возможность применения к различным МЭМС. К его недостаткам можно отнести более высокое сопротивление выводов по сравнению с металлическими.

Примером формирования выводов к контактным площадкам через нижнюю пластину (подложку), соединенную с крышкой с помощью металлического слоя, может служить корпусирование радиочастотного переключателя (рис. 4). Такие выводы обеспечивают хорошую работу ключа при частотах до 20 ГГц.



Рис. 3. Трехмерные схемы корпусированных С МЭМС фирмы e-Pak (a) и фотографии их внешнего вида с выводами *LFT* (6) и *VFT* (6) [1]

На рис. 5 приведены схема формирования боковых выводов и вид сверху высокодобротного резонатора фирмы *Discera, Inc.*, работающего при частотах порядка 10 МГц в вакууме около 0,3 Торр с добротностью ~6000.

Формирование электрических выводов при непроводящем соединительном слое. На рис. 6 (см. четвертую сторону обложки) показаны схемы формирования сквозных выводов к контактным площадкам от С МЭМС на внешнюю поверхность через верхнюю и нижнюю пластины (крышку и подложку соответственно) и сбоку на подложку при непроводящем соединительном слое между крышкой и подложкой.

В схеме, приведенной на рис. 6, а невозможно применить один и тот же процесс для соединения пластин и формирования выводов. При этом обычно сначала формируют соединение, а потом протравливают и заполняют металлом сквозные отверстия, обеспечивая хороший контакт с С МЭМС. В схеме, приведенной на рис. 6, б, также разделяют процессы формирования соединения и выводов, причем соединение может быть сформировано как с промежуточным слоем, так и без него, а формирование выводов как до, так и после соединения. При этом формирование сквозных выводов в подложке С МЭМС накладывает определенные температурные ограничения на процессы изготовления МЭМ ЧЭ и формирования соединения. В схеме, приведенной на рис. 6, в, не тре-

буется нанесения изолирующего слоя между выводом и соединительным слоями. При этом ступенчатая топография затрудняет сборку. Облегчить это затруднение помогает использование соединительного кольца.

На рис. 7 (см. четвертую сторону обложки) схематически показан пример формирования вывода через утоненную стеклянную крышку, которая в методе корпусирования с анодным соединением основания и крышки корпуса и перевернутой подложкой С МЭМС (метод *Flip Chip*) является нижней.

При этом сквозные отверстия формируются методом глубокого ионного травления (*DRIE*), а их заполнение осуществляется методом испарения металла, что обеспечивает остаточное давление в



Рис. 4. Схематическое изображение формирования выводов к контактным площадкам через подложку МЭМС (*a*) и микрофотография вида сверху радиочастотного переключателя, корпусированного соединением пластин слоя золота (*б*) [8]



Рис. 5. Схема формирования боковых выводов (a), вид сверху высокодобротного резонатора фирмы *Discera*, *Inc.* с боковыми выводами (δ) и зависимость его добротности от давления (s) [1]



Рис. 8. Микрофотографии резонатора из поликристаллического кремния с выводами на контактные площадки через сквозные отверстия в основании [4]

рабочей зоне без газопоглотителя, измеренное сенсором Пирани, около 11 Торр.

Примером реализации схемы, приведенной на рис. 6, δ (см. четвертую сторону обложки), может служить формирование выводов через сквозные отверстия в основании резонатора из поликристаллического кремния (рис. 8), обеспечивающее давление 0,01...0,1 Торр и добротность резонатора на уровне 8000. Такой резонатор выдерживает 392 ч при внешнем давлении 2 атм и температуре 121 °C без ухудшения добротности.

На рис. 9 показан пример реализации схемы, приведенной на рис. 6, *в*, формирования выводов (сбоку от крышки на подложку С МЭМС) при вакуумном корпусировании высокодобротного резо-



Рис. 9. Микрофотографии общего вида (a) и сечения в плоскости (δ) высокодобротного резонатора фирмы *Discera*, *Inc.*, корпусированного с помощью непроводящего соединительного слоя на основе пасты из стеклопорошка с боковыми выводами [1]

натора фирмы *Discera* с помощью непроводящего соединительного слоя шириной 1...2 мкм между крышкой и подложкой из пасты на основе стекло-порошка.

При правильном выборе режимов соединения (спекания стеклопорошка) и наличии газопоглотителя в резонаторе обеспечивается вакуум порядка 0,01 Торр, а добротность резонатора может достигать 54 000.

Формирование электрических выводов при тонкослойном капсулировании. На рис. 10, a-e (см. четвертую сторону обложки) показаны три схемы герметизации С МЭМС с помощью защитной оболочки по технологии нанесения тонких слоев с формированием выводов сверху, снизу и сбоку.

При реализации первой схемы (рис. 10, *a*) на изготовленный на подложке МЭМ ЧЭ наносят жертвенный слой, который затем покрывают достаточно толстым капсулирующим слоем. В этом слое протравливают до жертвенного слоя отверстия, через которые последний вытравливается. Для герметизации оболочки отверстия закрывают слоем диэлектрика. Электрические выводы на поверхности оболочки формируют нанесением тонкого слоя металла. Во второй схеме (рис. 10, δ) чувствительный элемент С МЭМС формируется на верхней части интегральной схемы специализированного назначения (ИССН) (*Application-Specific Integrated Circuit, ASIC*) с встроенными в нее выводами. Далее, аналогично первой схеме (рис. 10, *a*), МЭМ ЧЭ покрывают жертвенным слоем, на который наносят толстый корпусирующий слой, в нем протравливают отверстия, через которые вытравливается жертвенный слой, после чего отверстия герметизируют слоем диэлектрика. В третьей схеме (рис. 10, *в*) устройство МЭМС изготовляют на подложке с боковыми выводами к контактным площадкам, а затем его герметизируют аналогично первым двум схемам (см. рис. 10, *a*, *б*).

На рис. 11 показан пример капсулирования радиочастотного переключателя оболочкой из нитрида кремния (SiN_x), нанесенного методом стимулированного плазмой химического осаждения паров, с формированием выводов сбоку. Сначала на жертвенный слой из фосфор-силикатного стекла наносят слой SiN_x толщиной 1,7 мкм, в котором формируют отверстия для вытравливания жертвенного слоя (рис. 11, *a*). После вытравливания жертвенного слоя на слой нитрида кремния наносят герметизирующий слой SiO₂ толщиной 2...4 мкм методом стимулированного плазмой химического осаждения, обеспечивая газопроницаемость на уровне 3,3 · 10⁻¹² атм-см³/с.

Формирование электрических выводов при капсулировании эпитаксиальным кремнием. На рис. 12, *а* приведена микрофотография резонатора, капсулированного нанесением эпитаксиального слоя кремния (*Epi-seal process*), с цилиндрическими сквозными выводами через герметизирующий слой. Такая технология разработана фирмой *Silex Microsystems*. В аналогичных случаях фирма *AAC Microtec* предлагает использовать конические выводы (рис. 12, *б*).

В обоих случаях слой металла (Си или Au) формируется преимущественно на стенках сквозных



Рис. 11. Микрофотографии общего вида радиочастотного ключа с выводами сбоку и оболочкой из нитрида кремния с отверстиями для травления жертвенного слоя (*a*) и выводов при различном увеличении (δ —*г*) [1]



Рис. 12. Микрофотография разреза капсулированного МЭМ ЧЭ фирмы Silex Microsystems с вакуумированной полостью и цилиндрическими сквозными выводами через герметизирующий слой (a) и микрофотография разреза конических выводов через герметизирующий слой (б) (фирма AAC Microtec) [1]

отверстий. Для обеспечения герметичности в отверстиях для выводов создаются сужения. Герметичность таких выводов может быть нарушена вследствие различных ТКР материала герметизирующего слоя и металла.

2. Сохранение вакуума в рабочих полостях С МЭМС с использованием газопоглотителей

При любых методах вакуумплотного корпусирования С МЭМС давление в рабочей полости может возрастать в результате газовыделения из основных структурных и соединительных (герметизирующих) материалов. Для поддержания высокого вакуума в таких системах наиболее эффективным является использование неиспаряемых газопоглотителей в виде тонкого слоя фольги или порошка сплавов циркония, ванадия, титана и железа (рис. 13). Так, при корпусировании высокодобротного резонатора с помощью анодного соединения кремний—стекло при отсутствии газопо-



Рис. 13. Различные схемы вакуумплотного корпусирования С МЭМС-структур в сочетании с газопоглотителем [12]



Рис. 14. Фотография и электронная микрофотография слоя поглотителя на пластинекрышке (*a*) и схема стадий работы газопоглотителя на основе сплава ZrCo (δ -*c*): стадии хранения (δ), процесса активации (*в*) и активного состояния (*г*) [12]

глотителя минимально достижимо остаточное давление в 7 Торр, а при наличии газопоглотителя до 0,003 Торр. В качестве газопоглотителей обычно используют сплавы Ті, Zr, Co, V и Fe в форме столбчатых кристаллических структур с увеличенной площадью поверхности, наносимых методом распыления и активируемых термообработкой при 300...450 °C (рис. 14).

После активирования термообработкой при температуре около 400 °C сплав ZrCo способен растворять водород и хемосорбировать активные газы реакций с оксидом и карбидом циркония.

3. Методы контроля вакуума в рабочих полостях С МЭМС

Повышение давления в рабочих полостях МЭМС-структур может быть обусловлено не только газовыделением из образующих их материалов и частичной газопроницаемости, но и частичной или полной потерей герметичности вследствие повреж-

> дений (появления сквозных дефектов) в корпусе или защитной оболочке под воздействием окружающей среды и термоциклирования. Для контроля потери герметичности С МЭМС можно использовать стандартные методы, например, гелиевые течеискатели, радиоизотопный метод и методы ИК и масс-спектроскопии. Однако более эффективными являются методы непосредственного контроля вакуума (измерение давления) внутри рабочей полости С МЭМС.

> Определение давления по прогибу мембраны (диафрагмы). Прогиб w центра квадратной мембраны с закрепленными краями толщиной h и шириной a из материала с модулем упругости E (рис. 15) может быть рассчитан по формуле

$$w = 0,0151 \frac{(1 - v^2)}{Eh^3} a^4 \Delta P, \qquad (1)$$



Рис. 15. Микрофотография квадратной мембраны с закрепленными краями [1]

Прогиб центра квадратной мембраны толщиной h = 10 мкм с размером a = 1 мм из материала с модулем упругости E = 150 ГПа при различном давлении в полости и атмосферном давлении вне ее (1 атм = 760 Торр, 1 Торр = 133,3 Па) [1]

Давление в по- лости, Торр	100	10	1	0,1	0,01
Разность давле- ния с атмосфе- рой ΔP , кПа	87,978	99,975	101,1747	101,29467	101,306667
Прогиб центра мембраны <i>w</i> , мкм	8,502	9,662	9,778	9,789	9,790

где ΔP — разность давления между полостью и внешней средой; v — коэффициент Пуассона.

В таблице приведены рассчитанные значения прогиба в зависимости от давления в полости при внешнем атмосферном давлении и заданных размерах мембраны и модуле упругости материала.

Преимуществами этого метода являются простота и применимость в любых процессах корпусирования, а недостатками — малая разрешающая способность и ограниченная область вакуума (давление в полости должно превышать 1 Торр).

Использование вакуумных датчиков (сенсоров) Пирани. Принцип работы этих датчиков основан

на изменении общего сопротивления тонковолокнистого или тонкослойного (балочного) нагревательного элемента, обусловленного изменением его теплообмена с окружающей средой и, соответственно, температуры, при изменении давления газа в окружающей среде (рис. 16) [13, 14].

Общее сопротивление нагревательного элемента датчика в виде балки (рис. 16) при давлении P, подаваемом на элемент токе I_b и его сопротивлении в нормальных условиях R_0 , рассчитывается по формуле

$$R_{b} = R_{0} \left[1 + \frac{\delta \xi}{\varepsilon} \left(1 - \frac{\tan h \sqrt{\varepsilon} \frac{l}{2}}{\sqrt{\varepsilon} \frac{l}{2}} \right) \right]; (2)$$

$$\delta = \frac{I_{b}^{2} R_{0}}{k_{b} \omega l t}, \ \varepsilon = \frac{\eta k_{gas}(P)}{k_{b} t d} - \delta \xi, (3)$$

где δ — тепловыделение в соответствии с законом Ома; k_b — теплопроводность нагревательного элемента; w, l, t — его ширина, длина и толщина соответственно; ε — теплоотдача нагревательного элемента вследствие теплопроводно-

сти газа; η — коэффициент ветвления теплового потока; $k_{gas}(P)$ — коэффициент теплопроводности газа при давлении P; d — толщина воздушной прослойки (между нагревателем и подложкой, тепловым бассейном); ξ — термический коэффициент сопротивления нагревательного элемента. При этом изменение температуры нагревательного элемента оценивается по соотношению

$$\Delta T_{avg} = \left(\frac{R_b - R_0}{R_0}\right) \frac{1}{\xi}.$$
 (4)

По наклону прямолинейной зависимости ΔT_{avg} от потерь энергии W в мостиковой схеме, в которую включен нагревательный элемент, при различном давлении (рис. 17, *a*) определяется термический импеданс датчика, зависимость которого от давления для заданной конструкции датчика (рис. 17, *б*) служит калибровочной кривой для оценки давления в вакуумной полости С МЭМС.

На рис. 18 приведены примеры конструкций датчиков Пирани для С МЭМС.

В зависимости от конструкции, используемого материала и граничных термических условий датчики Пирани имеют различные кривые зависимостей термического импеданса от давления и в



Рис. 16. Принцип работы (*a*) и общий вид (б) балочного нагревательного элемента датчика Пирани [1]



Рис. 17. Зависимости ΔT_{avg} от потерь энергии *W*в мостиковой схеме, в которую включен нагревательный элемент, при различном давлении (*a*) и зависимости нормализованного термического импеданса датчика Пирани от давления для заданной конструкции датчика и при уменьшении его длины, ширины и толщины в 2 раза (*b*) [1]

общем случае могут измерять давление от 10^{-4} до 760 Торр. Для повышения чувствительности датчиков в высоком вакууме необходимо использовать более длинные и тонкие нагревательные элементы, минимизируя при этом неконтролируемые потери через подложку и расстояние между элементом и тепловой ванной (тепловым стоком). К основным достоинствам датчиков Пирани относятся простота конструкции, совместимость процесса их изготовления практически с любым процессом матричного изготовления и корпусирования С МЭМС, простота тестирования и высокая разрешающая способность при правильном выборе конструкции для требуемого интервала давления в вакуумной полости. К их недостаткам следует отнести различия в граничных условиях теплообмена до и после матричного корпусирования, что приводит к ошибкам в градуировании датчиков.

Использование балочных резонаторов. Принцип работы этих датчиков основан на изменении собственной (резонансной) частоты и добротности (*Q*-фактора) упругого (балочного) элемента вследствие изменения взаимодействия молекул газа с балочным элементом и их адсорбции на поверхности при изменении давления газа (рис. 19).

При вынужденных колебаниях мостикового элемента под действием актюатора вдоль оси *х* его собственную (резонансную) частоту рассчитывают по соотношению

$$f = 1,03 \sqrt{\frac{E}{\rho}} \frac{h}{L_r^2} \left(1 - \frac{V_P^2 \varepsilon_0 A}{d_0^3 k_m} \right)^{1/2},$$
 (5)

где E, ρ — модуль упругости и плотность материала балки; h, L_r , W_r — толщина, длина и ширина балки соответственно; V_p — напряжение, подаваемое на колеблющуюся балку (верхний электрод) и на неподвижный нижний электрод; A, d_0 — площадь перекрывания и исходное расстояние между ними; ε — диэлектрическая проницаемость вакуума; k_m — коэффициент упругости (жесткость) балки



Рис. 18. Примеры конструкций датчиков Пирани для МЭМС-устройств



Рис. 19. Принцип действия микробалочного резонатора с электростатическим актюированием колебаний (*a*) и схема его взаимодействия с молекулами загрязнений (*б*) [1]



Рис. 20. Зависимости Q-фактора от давления для различных типов упругих элементов резонаторов (*a*) и резонаторов с различной резонансной частотой (*б*) [1]

$$\left(k_m = \frac{32Eh^3W_r}{L_r^3}\right)$$
. Macca такого резонатора состав-

ляет всего 10^{-13} кг, и чем меньше его механическая жесткость и добротность, тем больше изменение его частоты при изменении давления.

В зависимости от типа упругого элемента, используемого материала, граничных механических условий и резонансной частоты вакуумные датчикирезонаторы имеют различную чувствительность — зависимость *Q*-фактора от давления (рис. 20).

К основным достоинствам вакуумных датчиков-резонаторов относятся: сравнительная простота конструкции, аналогичная многим сенсорам вибраций; совместимость процесса их изготовления практически с любым процессом матричного (на уровне пластин) изготовления и корпусирования С МЭМС, особенно с использованием технологий микрообработки моно- и поликристаллического кремния; высокая разрешающая способность при достигаемом в стандартных процессах вакуумного корпусирования уровне вакуума. К их недостаткам следует отнести различия в механических граничных условиях до и после матричного корпусирования, что приводит к ошибкам в *Q*-факторе датчиков, а также некоторые трудности их тестирования.

4. Тенденции развития процессов корпусирования С МЭМС

Основное направление развития С МЭМС устройств связано с уменьшением их размеров, совершенствованием конструкций и процессов матричного производства и корпусирования на уровне пластин. На рис. 21 схематически показано соблюдение закона Мура применительно к МЭМС (уменьшение размера вдвое каждые 4 года) в 2008—2012 годах за счет совершенствования конструкции и способов корпусирования.

Уменьшение размеров корпусов может быть достигнуто за счет использования новых материалов и процессов для соединения пластин, например, при переходе от соединений на основе пасты стек-



Рис. 21. Соблюдение закона Мура применительно к МЭМС-устройствам (уменьшение размера вдвое каждые 4 года) в 2008—2012 гг. [1]



Рис. 22. Микрофотографии соединений с использованием пасты стеклопорошка (*a*), золота (*б*) и *TSV*-технологии (*в*) [1]

лопорошка к соединениям на основе металлов и их эвтектических сплавов, а также к сочетанию метода создания внутрикремниевых соединений (*Through-Silicon Vias, TSV*-технологии) и корпусирования на уровне пластин (*WLP*-технологии) (рис. 22).

Существенное уменьшение размеров корпусов может быть достигнуто также за счет разработки новых принципов корпусирования, в частности, за счет перехода от использования блочных крышекпластин, являющегося в настоящее время стандартным методом, к микросотовым крышкам с уменьшением размеров на 45 % и к капсулированию на месте (*in situ*) по технологиям нанесения тонких защитных слоев с уменьшением размеров еще на 30 % (рис. 23).

Важнейшее значение для совершенствования и уменьшения размеров С МЭМС имеет разработка методов компьютерного моделирования и проектирования процессов их корпусирования [15—18]. Фирма *Coventor* разработала стандартные библиотеки корпусирования МЭМС-устройств — *Standard Package Libraries (SPLs) for MEMS*, которые позволяют выбирать конструкцию корпуса и процесс корпусирования на основе готовых моделей, а также анализировать влияние корпусирования на работу устройства [19]. Имея доступ к банку данных о геометрии корпусов и свойствах материалов, проектант может выбирать специфическую концепцию корпусирования из набора типов корпусирования из

сов, проектировать их с учетом требуемых характеристик и возможного влияния термомеханических эффектов, а также модифицировать характеристики корпуса с учетом специфических требований к микросистеме. Использование стандартных библиотек сокращает сроки проектирования, уменьшает риск и сроки выхода



Рис. 23. Схематическое изображение перехода (сверху вниз) от принципа корпусирования с использованием блочных крышекпластин, к микросотовым крышкам, получаемым по технологии *Hexsil* и *in situ* капсулированию, обеспечивающему уменьшение размеров на 75 % [1]



Рис. 24. Примеры корпусов С МЭМС фирм ST-Microelectronics и OKI Electric Industry, Kionix, разработанных фирмами Kyocera и Hymite соответственно с использованием стандартных библиотек корпусирования С МЭМС фирмы Coventor Inc. (Coventor Ware™) [20, 21]

на рынок. Программа ARCHITECT может быть использована для объединенного моделирования устройства и его корпусирования, например, для учета влияния напряжений, возникающих при корпусировании, на характеристики микросистемы. Фирма *Coventor* налаживает партнерские отношения с разработчиками процессов корпусирования МЭМСустройств, предлагая библиотеки, содержащие предустановленные сеточные модели более чем 30 стандартных корпусов. Эти библиотеки можно использовать совместно с набором программ для проектирования процессов производства МЭМСустройств, что способствует быстрой оценке вариантов корпусирования на начальных стадиях проектирования устройств. Основные библиотеки включают данные для проектирования керамических корпусов японской фирмы *Куосега* и корпусирования МЭМС-устройств на уровне пластин датской фирмы *Hymite*. На рис. 24 показаны примеры корпусов С МЭМС ST-Microelectronics и OKI Electric Industry, Kionix, разработанных фирмами *Куосега* и *Нутіte* соответственно [20, 21].

Заключение

Проведенный анализ современной литературы показывает, что к настоящему времени разработаны различные эффективные способы формирования вакуумплотных электрических выводов к контактным площадкам при использовании как токопроводящих, так и непроводящих соединительных слоев, а также методы поддержания и контроля вакуума в рабочих полостях С МЭМС. Общие тенденции развития технологий корпусирования С МЭМС направлены на уменьшение размеров корпусов за счет использования новых материалов и процессов для соединения пластин, в первую очередь, соединений с помощью эвтектических сплавов, а также на компьютеризацию моделирования, проектирования, производства, испытания и оценки надежности и жизнеспособности С МЭМС в единой системе обеспечения их жизненного цикла. Разрабатывается и совершенствуется специализированное оборудование для корпусирования таких систем. Об интенсивности работ в этих направлениях свидетельствует как огромное число публикаций, так и число выдаваемых патентов.

Список литературы

1. **Рилей Д. А.** Мир микро- и наноэлектроники: Учебное пособие по современным технологиям в производстве микросистем. Ч. 1–2. / Пер. с англ. М.: Экспромт, 2009. Ч. 1. – 287 с., Ч. 2. – 345 с.

2. Gerlach G., Wolter K.-J. Bio and Nano Packaging Techniques for Electron Devices. Advances in Electronic Device Packaging. Berlin: Springer-Verlag, 2012. 625 p. 3. Chen A., Lo R. H.-Y. Semiconductor

Packaging: Materials Interaction and Reliability B. R.: CRC Press Taylor & Francis Group, 2012. 187 p.

4. Senturia S. D. Microsystem Design. N. Y.: Kluver Academic Publishers, 2002. 689 p.

5. **Tummala R. R.** Fundamentals of Microsystems Packaging. N. Y.: McGraw Hill, 2001. 967 p.

6. Rahman M. S., Chitteboyina M. M., Butler D. P. at el. Device-level vacuum packaging for RF MEMS // Journal of Microelectromechanical Systems, Aug. 2010. Vol. 19, N 4. P. 911–918.

7. Lau J. H., Lee Ch., Premachandran C. S. Aibin Yu. Advanced MEMS Packaging. N. Y.: McGraw Hill, 2010. 551 p.

8. **Wan-Thai Hsu.** Wafer Level Vacuum Packaging for Sensors // IEEE Sensors 2012. Taipei, Taiwan. Oct. 28–31. 2012. P. 1–60.

9. Candler R. N., Park W.-T., Li H. at el. Single wafer encapsulation of MEMS devices // IEEE Transactions on Advanced Packaging. 2003. Vol. 26, N 3. P. 227–232.

10. **Reinert W.** Advanced Solder Materials for High Temperature Application (HISOLD) Working Group Meeting // MEMS Packaging, Vienna, July 3, 2008. P. 18–23.

11. Fraux R., Baron J. STMicroelectronics' innovation in wafer-to-wafer bonding techniques shrinks MEMS die size and cost // System Plus Consulting. 2011, N 21. P. 24–26.

12. **Sparks D. R., Massoud-Ansari S., Najafi N.** Chip-Level Vacuum Packaging of Micromachines Using NanoGetters // IEEE Transactions on Advanced Packaging. 2003. Vol. 26, N 3. P. 277–282.

13. **Computer**-Aided Design and Applications, CADSolutions, LLC. URL: http://www.cadanda.com.

14. Xiaolin Chen, Wei Cui, Wei Xue. Process Modeling and Device-Package Simulation for Optimization of MEMS Gyroscopes // Computer-Aided Design and Applications. 2009. Vol. 6, N 3. P. 375–386.

15. Gilleo K. MEMS/MOEMS Packaging: Concepts, Designs, Materials, and Processes. N. Y.: McGraw-Hill, 2005. 220 p.

16. **Daniel D., Evans Jr.** Advances in MEMS Packaging. Design considerations. Advanced Packaging. 2008. N 4/9. P. 1–5.

17. Santagata F., Zaal J., Huerta V. et al. Mechanical design and characterization for MEMS thin-film packaging // Journal of Microelectromechanical Systems. 2011. Vol. 21. N 1. P. 100–109.

18. Santagata F., Iervolino E., Mele L., Creemer J. F., van Herwaarden A. W., Sarro P. M. An analytical model and verification for MEMS Pirani gauges // Journal of Micromechanics and Microengineering. 2011. Vol. 21. N 11. 7 p.

19. Santagata F., Creemer J. F., Iervolino E., Mele L., van Herwaarden A. W., Sarro P. M. A tube-shaped buried pirani gauge for low detection limit with small footprint // Journal of Microelectromechanical Systems. 2011. Vol. 20. N 3. P. 676–684.

20. Sankarapillai C. P., Nagarajan R., Soundarapandian M. Method of forming through-wafer interconnects for vertical wafer level packaging // US 7381629, June 3, 2008.

21. Heck J., Hayden J. S., Greathouse S. W., Wong D. M. MEMS packaging using a non-silicon substrate for encapsulation and interconnection // US 7368808. May 6, 2008.

К. А. Брехов^{*1}, стажер-исследователь, **С. Д. Лавров**¹, стажер-исследователь,

М. С. Афанасьев¹, канд. техн. наук, доц., **Н. Э. Шерстюк**¹, канд. физ.-мат. наук, ст. науч. сотр.,

Е. Д. Мишина¹, д-р физ.-мат. наук, проф., А. В. Кимель², канд. физ.-мат. наук, доц.,

¹ Московский государственный технический университет МИРЭА

² Radboud University Nijmegen,

* e-mail: brekhov_ka@mail.ru

ЛИНЕЙНЫЙ ЭЛЕКТРООПТИЧЕСКИЙ ЭФФЕКТ В ПЛЕНКАХ BST: РАСЧЕТ КОЭФФИЦИЕНТА КЕРРА

Поступила в редакцию 08.11.2013

Проведены экспериментальные исследования методом конфокальной микроскопии пространственного распределения угла поворота плоскости поляризации падающего излучения в межэлектродном пространстве в пленке титаната бариястронция толщиной 1 мкм. Образец изготовлен методом высокочастотного осаждения при распылении керамических мишеней. Электрическое поле прикладывалось в плоскости пленки с помощью планарных хромовых электродов с зазором 35 мкм. Показано, что в исследуемой структуре присутствует значительное изменение угла поворота плоскости поляризации падающего излучения в зависимости от локальной области пленки.

Ключевые слова: сегнетоэлектрики, титанат бария-стронция (БСТ), планарная геометрия, поляризация, электрооптический коэффициент Керра

K. A. Brekhov, S. D. Lavrov, M. S. Afanasiev, N. E. Sherstyuk, E. D. Mishina, A. V. Kimel LINEAR ELECTROOPTICAL EFFECT IN BST FILMS: KERR COEFFICIENT CALCULATION

Experimental studies by confocal microscopy were made, the spatial distribution of the angle of the plane polarization rotation of the incident radiation in the area between the electrodes in the 1 μ m barium strontium titanate film. A sample is made by HF sputtering deposition of ceramic targets. An electric field applied in the plane of the film using planar Cr electrodes with a gap of 35 microns. It was demonstrated that the test structure had a significant change of the incident radiation plane polarization angle depending on the local region of the film.

Keywords: ferroelectrics, barium strontium titanate (BST), in-plane geometry, polarization, Kerr electro-optical coefficient

Введение

Тонкие пленки ($Ba_{1-x}Sr_{x}$)TiO₃ (BST) привлекательны для практических применений в различных областях микроэлектроники и оптоэлектроники. Тонкие пленки BST обладают стабильными характеристиками в широком диапазоне температур и малыми потерями, что делает перспективным их использование в качестве активных элементов в высокочастотных устройствах [1].

Керамика на основе твердых растворов титаната бария-стронция ($Ba_{1 - x}Sr_xTiO_3$, BST) является одним из наиболее широко исследуемых объектов в области сегнетоэлектрического материаловедения [2]. Высокие диэлектрические характеристики таких материалов и возможность управлять их параметрами с помощью внешних воздействий (в частности, электрическим полем) обусловливают их широкое использование при создании элементов памяти, конденсаторов, техники СВЧ. Кроме того, BST является одним из наиболее перспективных пироэлектрических материалов.

При создании различных устройств на основе титаната бария-стронция необходимо учитывать

различные параметры данного материала. Одним из важнейших таких параметров является электрооптический коэффициент Керра.

Отличительным свойством BST является то, что его диэлектрические и сегнетоэлектрические характеристики монотонно меняются с изменением отношения Ba/Sr. Температура фазового перехода (температура Кюри) варьируется от $T_c \approx 120$ °C для чистого BaTiO₃ (x = 0) до комнатной при x = 0,35. К недостаткам BST следует отнести сильную температурную зависимость его параметров в области температуры Кюри, сдерживающую его практическое использование.

В данной работе представлены результаты исследования распределения угла поворота плоскости поляризации падающего излучения в зависимости от локальной области образца методом конфокальной микроскопии в пленке BST толщиной 1 мкм.

Методика эксперимента

Образец пленки ($Ba_{0,8}Sr_{0,2}TiO_3$) толщиной 1 мкм был изготовлен методом высокочастотного распыления стехиометрических мишеней на подложках

MgO [3]. Стехиометрические мишени распылялись при повышенных давлениях кислорода (~1 Торр) и высокой удельной ВЧ мощности (70...100 Вт/см²), подводимой к распыляемой мишени. Распыление происходило не в условиях уменьшения неравновесного состояния ионно-плазменной системы, а наоборот, при еще большем его усилении до появления эффектов самоорганизации. В результате такого распыления получаются гетероэпитаксиальные пленки высокого качества [3].

Для измерения электрооптических характеристик на поверхности пленки методом термического напыления формировали планарную систему хромовых электродов с зазором 35 мкм. Напряженность электрического поля в зазоре составляла порядка 10⁶...10⁷ В/м. Сравнительно большая площадь электродов (порядка 10 мм²) обеспечивала высокую однородность поля в зазоре. Сопротивление структуры составило примерно 10 МОм.

На рис. 1 приведена микрофотография и схематическое изображение структуры образца.

Для проведения экспериментальных исследований свойств тонких пленок титаната бариястронция использовали излучение перестраиваемого лазера на кристалле сапфира, допированного ионами титана (ООО "Авеста-Проект", Россия) с длительностью импульса около 100 фс, средней мощностью излучения до 0,7 Вт, частотой повторений примерно 82 МГц и длиной волны излучения $\lambda = 800$ нм. Для сканирования пленки внутри зазора между электродами и увеличения пространственного разрешения излучение лазера заводилось в конфокальный микроскоп (рис. 2, *a*). Диаметр







гис. 2. Схематичное изооражение ооразца в конфокальном микроскопе (a); схематичное изображение направления приложенного поля и плоскости поляризации падающего излучения (δ)

пятна лазера составлял около 1...2 мкм, числовая апертура объектива 0,65, объектив ×40. Регистрация сигнала осуществлялась балансным фотодетектором. Электрическое поле *E* прикладывали по оси *X* в статическом режиме при скачкообразном изменении с шагом 25 В. Угол θ между плоскостью поляризации падающего излучения и осью *X* в плоскости *XY* (плоскость поверхности образца) составлял 45° (рис. 2, δ).

На рис. 3 (см. третью сторону обложки) представлена картина распределения угла поворота плоскости поляризации падающего излучения при приложении электрического напряжения до 300 В. На изображении представлена область образца размером 60×30 мкм. Справа и слева отчетливо видны электроды. Видно, что угол поворота плоскости поляризации увеличивается к центру зазора, а в приэлектродной области его значение заметно меньше.

Такая неоднородность распределения угла поворота определяется неоднородностью распределения электрического поля в зазоре.

Расчет электрооптического коэффициента Керра

Электрооптический эффект описывается выражением

$$n = n_0 + \chi E^2, \tag{1}$$

где коэффициент преломления *n* зависит от напряженности внешнего электрического поля *E*. Здесь n_0 — коэффициент преломления для E = 0, χ — электрооптический коэффициент Керра.

В геометрии данного эксперимента угол поворота плоскости поляризации определяется из выражения

$$tg(\alpha) = \frac{R_Y}{R_X} - 1,$$
 (2)

где R_X и R_Y — коэффициенты отражения для света, поляризованного по оси X и оси Y соответственно.

Будем считать, что отражение определяется вещественной частью комплексного коэффициента преломления $\tilde{n} = n - ik$. Для $\lambda = 800$ нм $n \gg k$, поэтому $R = \left(\frac{n-1}{n+1}\right)^2$.

Также будем считать, что поле, приложенное по оси X, меняет коэффициент преломления только для света, поляризованного вдоль оси X.

Тогда получим

$$R_X = \left(\frac{n_0 + \chi E^2 - 1}{n_0 + \chi E^2 + 1}\right)^2 \tag{3}$$

$$R_Y = \left(\frac{n_0 - 1}{n_0 + 1}\right)^2.$$
 (4)

И

13

Подставляя формулы (3) и (4) в формулу (2), получим выражение, из которого можно вычислить электрооптический коэффициент Керра.

$$tg(\alpha) = \frac{(n_0 - 1)^2 (n_0 + \chi E^2 + 1)^2}{(n_0 + 1)^2 (n_0 + \chi E^2 - 1)^2} - 1.$$
 (5)

Для пленки титаната бария-стронция значение электрооптического коэффициента Керра оказалось равным $\chi \approx 3.8 \cdot 10^{-16} \text{ м}^2/\text{B}^2$.

Заключение

Таким образом, показано, что для пленки титаната бария-стронция толщиной 1 мкм с планарной системой электродов наблюдается сильная неоднородность распределения угла поворота плоскости поляризации падающего излучения в межэлектродном пространстве. Видно, что в центре зазора угол значительно выше, чем в приэлектродной области, что связано с неоднородностью распределения электрического поля. Также было рассчитано, что электрооптический коэффициент Керра для исследуемой структуры титаната бария-стронция равен $\chi \approx 3.8 \cdot 10^{-16} \text{ m}^2/\text{B}^2$.

Работа выполнена при поддержке Министерства образования и науки РФ (ФЦП "Научные и научно-педагогические кадры инновационной России" на 2009—2013 годы, № 14.В37.21.0899, РФФИ № 12-07-00662-а, РФФИ 12-02-33158).

Список литературы

1. Широков В. Б., Бирюков С. В., Мухортов В. М., Юзюк Ю. И. Поляризация тонких пленок титаната бариястронция при действии внешнего электрического поля // ЖТФ. 2011. Т. 81, № 8. С. 115–120.

2. Шут В. Н., Сырцов С. Р., Трубловский В. Л. Градиентная керамика титаната бария-стронция, изготовленная методом шликерного литья // Неорганические материалы. 2011. Т. 47, № 1. С. 94—100.

3. Мухортов В. М., Толмачев Г. Н., Головко Ю. И., Мащенко А. И. Гетероэпитаксиальный рост пленок сложного оксида из самоорганизованной системы, образующейся в плазме газового разряда // ЖТФ. 1999. Т. 69. Вып. 12. С. 87—91.

УДК 539.612

К. Б. Фрицлер, канд. физ.-мат. наук, мл. науч. сотр., В. А. Селезнев, канд. физ.-мат. наук, ст. науч. сотр., В. Я. Принц, д-р физ.-мат. наук, проф., зав. лаб.,

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт физики полупроводников им. А. В. Ржанова Сибирского отделения Российской академии наук, г. Новосибирск, e-mail: prinz@isp.nsc.ru

МИКРО- И НАНОСТРУКТУРИРОВАННЫЕ ГЕККОН-АДГЕЗИВЫ: ФОРМИРОВАНИЕ И ПРАКТИЧЕСКИЕ ПРИМЕНЕНИЯ

Поступила в редакцию 04.12.2013

Проанализированы тенденции в развитии методов формирования сухих адгезивов. Приведен обзор их практических применений в микроробототехнике, медицине и других областях.

Ключевые слова: микро- и наноструктурированные материалы, сухие адгезивы, робототехника

K. B. Fritzler, V. A. Seleznev, V. Ya. Prinz

MICRO- AND NANOSTRUCTURED GECKO-INSPIRED ADHESIVES: FABRICATION AND APPLICATIONS

Advanced trends of the dry adhesive fabrication methods are analyzed. The review of their practical applications in microrobot-technique, medicine and other fields is presented.

Keywords: micro- and nanostructured materials, dry adhesive, robot technique

Введение

Эффективной стратегией создания новых приборов и систем является копирование структуры и функций объектов живой природы. С развитием нанотехнологий возможности такого подхода расширились. В частности, стало возможным исследовать структуру лапок гекконов, благодаря которой эти ящерицы легко могут подниматься по вертикальным стенам и даже перемещаться по потолку. Удалось понять, наконец, механизм адгезии лапок и сформировать их имитирующий микрои наноструктурированный адгезивный материал. В настоящем обзоре проанализированы тенденции в улучшении методов изготовления и параметров геккон-адгезивов, приведен обзор практических применений в микроробототехнике, медицине и других областях.

1. Механизм адгезии лапок геккона

Долгое время исследователям не удавалось найти объяснение замечательным способностям гекконов. Лишь в 1960-е годы Hiller [1, 2], применив электронную микроскопию, исследовал структуру ворсинок, покрывающих лапки геккона, и выявил ее иерархический, многоуровневый характер. Следующим важным шагом в понимании механизма прикрепления геккона к поверхности были работы Kellar Autumn [3—5], позволившие измерить параметры адгезии волокон этой ящерицы.

Исследователями обнаружено, что лапки гекконов (рис. 1) покрыты рядами микроворсинок длиной порядка 30...130 мкм и диаметром около 5 мкм. Каждая микроворсинка разветвляется на 100...1000 нановорсинок диаметром 80...500 нм. На вершине каждой из них расположено пластинчатое утолщение от 200 до 300 нм с небольшим углублением в середине. Выявлено, что ворсинки состоят из β-кератина, имеющего модуль Юнга, равный 1...4 ГПа, этот материал является гидрофобным. В работе [3] показано, что основной вклад



a — геккон; δ — лапка ящерицы; s — микроворсинки, r — изображение отдельной ворсинки; ∂ — нановорсинки. Рис. 1, s—d получены с помощью сканирующего электронного микроскопа



Рис. 2. Схематическое изображение прикрепительных ворсинок в процессе движения: *a* — закрепление, *б* — отделение

в притяжение ворсинок к поверхности вносят силы Ван-дер-Ваальса.

В работе [6] приведены результаты экспериментального исследования динамики движения геккона по вертикальной поверхности. Скорость движения геккона по вертикальной стенке достигает 77 см/с. Активное прикрепление осуществляется с помощью захватывающего движения по направлению к поверхности, при котором прикрепительные ворсинки при сокращении мышц несколько выпрямляются и прижимаются к основанию. При этом ворсинки слегка изгибаются в форме буквы S (рис. 2). Чтобы оторвать палец от поверхности, гекконы поднимают его спереди, что напоминает раскатывание. Отрыв лапки от поверхности происходит постепенно, поочередным откреплением ворсинок, а не сразу по всей площади соприкосновения лапки с поверхностью, поэтому требует приложения небольшого усилия.

Механика контактного взаимодействия упругих, вязкоупругих и пластичных тел при адгезионном контакте описывается теорией Джонсона, Кендала и Робертса (ДКР-теория). Для сферического объекта и плоской поверхности, согласно теории ДКР [7], сила отрыва (или сила адгезии) будет составлять:

$$F_{\rm c}=\frac{3}{2}\pi R\gamma,$$

где *R* — радиус сферы; *γ* — работа адгезии.

Согласно теории ДКР [8], если разделить сферический объект на *n* контактов, имеющих такую же площадь, то сила адгезии возрастет в $n^{1/2}$ раз. Таким образом, сила адгезии формируется суммой сил адгезии каждой нановорсинки, а их число на одной лапке геккона составляет от 50 до 500 млн. Сила, с которой каждая ворсинка прикрепляется к поверхности, небольшая и составляет всего 10^{-7} H/cm², но благодаря их большому числу геккон мог бы удержать двух взрослых людей. Данный принцип лежит в основе природной способности гекконов прикрепляться к различным поверхностям и используется для создания искусственных адгезивов на его основе.

Методы изготовления адгезивных материалов

Одноуровневые адгезивные структуры. Одной из первых работ, посвященных созданию материалов для геккон-адгезии, была статья Гейма, Новоселова и соавторов [9]. Сетка полиамидных волокон диаметром 0,2...4 мкм и высотой 0,15...2 мкм была изготовлена с помощью электронно-лучевой литографии. Данная работа позволила получить модельную структуру, прекрасно продемонстрировавшую потенциальную возможность создания наноструктурированных адгезивов. Но для практического применения этот метод оказался малопригодным. Изготовленная структура выдерживала всего несколько циклов использования. Помимо этого, электроннолучевая литография является дорогостоящим методом, процесс изготовления занимает достаточно продолжительное время, несовместимое с возможностью изготовления поверхности большой площади, пригодной для практического использования.

Для получения первых волоконных адгезивных материалов также применяли метод с использованием поликарбонатных трековых мембран и мембран на основе анодированного оксида алюминия [10—13]. Размер пор в мембранах может составлять от нескольких нанометров до микрометров. Данную структуру можно наполнить прекурсором полимеров, их раствором или расплавом и затем получить полимерную пленку, содержащую волокна, повторяющие форму пор. Недостатком является необходимость в большинстве случаев удалять мембраны с помощью химического травления. Трафарет, таким образом, уничтожается, а процесс травления с помощью щелочи занимает много времени и может вызвать набухание полимера и слипание волокон.

Рядом авторов в качестве покрытия для сухих адгезивов предложены вертикально вытянутые углеродные нанотрубки (УНТ) [14–18]. УНТ имеют меньший диаметр (10...20 нм), чем ворсинки гекконов (<200 нм), и могут иметь большую длину (>65 мкм), обладая высоким соотношением длина/толщина [18]. Недостатком является то, что УНТ имеют тенденцию склеиваться со своими ближайшими соседями, образуя плотные "пакеты", что ухудшает адгезивные свойства материала из-за уменьшения точек контакта. Также волокна деформируются даже после однократного использования, что затрудняет многократное повторение циклов прилипания/открепления [18]. Коммерческое использование затрудняет и высокая стоимость изготовления данных адгезивов.

Одним из наиболее распространенных способов изготовления структур для сухих адгезивов является штамповая микро- и нанолитография [19, 20]. Использование данной методики существенным образом удешевляет процесс производства структурированных поверхностей для сухих адгезивов, позволяя сократить время изготовления и увеличить площадь рабочей поверхности. Большинство коммерчески доступных сухих адгезивов изготавливаются именно эти методом.

Штамповая литография представляет собой группу методов, позволяющих формировать рельеф на поверхности полимерного материала с помощью структуроформирующих штампов. В этой методике часто используют полидиметилсилоксан (ПДМС) [21—26]. Данный материал применяют как для изготовления штампов в процессах структурирования поверхностей полимеров, так и для производства готовых к использованию сухих адгезивов. В процессе создания рельефа ПДМС штамп заполняют расплавленным полимером [21], растворами [22, 23] или прекурсорами полимеров [24, 25].

Преимуществом ПДМС является низкая поверхностная энергия и химическая инертность, которые упрощают его отделение от отпечатка или от мастер-штампа. Недостатком этого материала является низкая жесткость. Вследствие этого при соотношении размеров длина/толщина, превышающем 4, нарушается механическая стабильность микроволокон и наблюдается их слипание [26]. В качестве примера сухого адгезива, изготовленного из ПДМС, можно привести материал площадью 25 см², содержащий волокна радиусом 1...25 мкм и длиной 5...80 мкм [26].

Для изготовления материалов с обратимой адгезией необходимы структуры с наклонными относительно подложки волокнами. Наклонное положение волокон облегчает отсоединение адгезива от поверхности.

В работах [25, 27—29] представлены структуры, изготовленные из полиуретана (ПУ). Мастер-шаблон с наклонными отверстиями в данном случае формируется с помощью фотолитографии. Для этого при засвечивании подложку с нанесенным фоторезистом наклоняют на необходимый угол.

В работе [30] описан способ, в котором для формирования поверхности с наклонными волокнами, а также различной симметрии образованных ими решеток, используют деформированный ПДМС-штамп.

Также для создания материала с обратимой адгезией применяют полимеры с памятью формы. В [31] для этого использовался полимер Tecoflex. Недостатком метода является то, что переключить таким образом адгезивные свойства структуры можно лишь один раз.

Иерархические (многоуровневые) адгезивные структуры. Целью создания данного вида искусственных адгезивов является стремление скопировать многоуровневую структуру ворсинок ящериц —



Рис. 3. Схема метода формирования двухуровневой структуры из полиуретана [35]: a — структура со сформированными волокнами (первый уровень) помещается в жидкий полимер; δ — формирование капель жидкого полимера на вершинах столбиков; e — заполнение жидким полимером пор на наноструктурированном штампе; e — готовая двухуровневая структура

гекконов. Для ее получения может применяться фотолитография с многошаговым экспонированием. В данном случае используется последовательность процессов нанесения фоторезиста и его засветки через различные маски [32, 33]. Геометрия волокон при этом определяется используемой маской и может варьироваться.

В работе [34] описано получение многоуровневой адгезивной структуры с помощью стека из микро- и нанопористых мембран, изготовленных на основе анодированного оксида алюминия.

Авторами [35, 36] предложен следующий метод (рис. 3, 4). Полиуретановая заготовка (первый уровень структуры) помещается в расположенный на донорной пластине слой жидкого полимера. Затем структура преносится на кремниевую пластину с окисным слоем, в котором вытравлены отверстия. Втягиваемый капиллярными силами жидкий полимер заполняет их и формирует волокна (второй уровень иерархической структуры).

В работе [37] первый иерархический уровень — микроволокна, которые получают на полиметилметакрилатовой (ПММА) пленке с помощью ПДМС-штампа (рис. 5). На их вершинах, используя полиуретан — акриловый штамп, формируют нановолокна.

Объемно-структурированные адгезивные структуры. Авторами [38, 39] проведены исследования влияния формы волокон на прочность прикрепления к поверхности. Продемонстрировано существенное влияние формы контакта на силу адгезии. Для получения сферической верхушки волокон полученную структуру помещали в нанесенный на подложку слой

прекурсора, затем, после извлечения, его капли оставались на вершинах столбиков. Под действием сил гравитации и поверхностного натяжения вершины столбиков принимали полусферическую форму. Если же столбики с нанесенными на них каплями полимера прижимались к подложке, то в результате получались волокна, имевшие плоскую площадку на вершине. Если наклонить подложку с прекурсором, то данная площадка может располагаться асимметрично. По данным работы [39] наилучшей адгезией из представленных архитектур обладают волокна с плоской симметричной площадкой на вершине.

Измерение параметров адгезии

Для оценки качества адгезивных свойств микро- и наноструктурированных материалов в исследовательских лабораториях используют различные



Рис. 4. Изображение двухуровневой структуры, полученное с помощью сканирующей электронной микроскопии [35]



Рис. 5. Получение многоуровневой адгезивной структуры методом двухэтапной штамповки [37]:

a— размещение ПДМС — штампа на поверхности полимера; δ — нагрев; e— отсоединение штампа

Источник публикации	Мате- риал	Сила отры- ва, Н	Сила сдви- га, Н	Пло- щадь, мм ²	Предвари- тельная нагрузка, H/см ²
Природная адгезивная система геккона [6]	β-кера- тин	1	10	100	<0,01
Geim [9]	Поли- амид	3	Нет сведе- ний	100	50
Jeong и др. [23]	ПММА	~0	3	100	<1
Ge и др. [15]	УНТ	0,8	16	16	2550
Qu и Dai [14]	УНТ	~5	~2,5	16	125
Maeno и Nakayama [17]	УНТ	—	45	100	50
Zhao и др. [16]	УНТ	0,5	0,6	8	>500
Murphy, Aksak, Sitti, [27]	Поли- уретан	5	10	100	—
Sitti и Fearing [10]	ПДМС	0,003	Нет сведе- ний	100	0,025

Сравнител	ьные	характ	еристики
некоторых	адгез	вивных	структур

методики. Единого, стандартного способа измерения в настоящее время не существует, что затрудняет сравнение результатов, полученных различными авторами. В основе большинства методик измерения лежит контактный тест (испытание на отрыв). Исследуемый образец приводится в соприкосновение с поверхностью, к нему прикладывается определенная нагрузка, перпендикулярная к поверхности (предварительное нагружение). Затем для отрыва образца используется сила, направленная перпендикулярно (для измерения нормальной адгезии) или параллельно (сдвиговая адгезия) поверхности. В процессе измерения контролируют силу, площадь соприкосновения, смещение, что обеспечивает полную информацию об адгезивных свойствах исследуемого материала.

Методы характеризации сухих адгезивов развивались параллельно со способами их изготовления и зачастую были недостаточно точными. Например, в работах [9, 14] для измерения свойств адгезии материала использовались лабораторные весы. Довольно часто для анализа адгезии применя-

ют атомно-силовую микроскопию (ACM) [9, 10]. В ряде работ [25, 26, 35, 38, 39, 40—42] представлены созданные авторами установки, использующие различного рода инденторы. В этом случае для контроля области контакта образца с поверхностью можно использовать оптический микроскоп [19, 25, 36, 41, 42, 56, 57] или высокоразрешающий видеомикроскоп [40]. Кроме вышеописанных лабораторных установок ряд исследователей использовали коммерческие наноинденторы компании Hysitron [41, 42] и MTS NanoXP [43].

Сравнительные характеристики ряда структур представлены в таблице. Максимальные значения адгезии на образцах достаточно большой площади составляют около 50 H/см², что соответствует на-грузке 5 кг/см².

Практическое применение

Использование сухих адгезивов при создании приборов и устройств в различных областях технологии позволяет существенно расширить их возможности. Приведем сферы возможного применения материалов, использующих механизм гекконадгезии. 1. Использование в качестве монтажного материала в строительстве, приборостроении. Возможно применение сухих адгезивов для крепления приборов, датчиков на любого рода поверхности — стекло, стены, корпуса оборудования, различные приборные панели.

2. Микроробототехника — адгезивное покрытие для контактных поверхностей ползающих и ша-гающих микророботов.

3. Промышленность — захваты манипуляторов для перемещения различного рода грузов: линии автоматической сборки, упаковки и т. п. Микро-манипуляторы для сборки микроэлектромеханических систем.

4. Медицина.

5. Промышленный и спортивный альпинизм — элементы одежды для крепления к вертикальным поверхностям (перчатки, обувь), крепление инструментов.

6. Спорт — перчатки, обеспечивающие надежное сцепление с различным спортивным снаряжением.

7. Транспорт — шины с улучшенным сцеплением, крепление к корпусу, стеклам, приборным панелям различных устройств.

Работы по внедрению сухих адгезивов в приведенных выше областях продвигаются неравно-

мерно. В некоторых областях получены первые результаты исследований или созданы опытные образцы и прототипы. В то же время часть разработок доведена до практического применения и представлена на рынке. К числу последних можно отнести ряд липких лент на основе сухих адгезивов, например Gecko Nanoplast и Geckskin.

Авторами [44] разработан материал Geckel. Он может обеспечивать силу адгезии 10 H/см². Структура изготавливается из ПДМС (рис. 6) и содержит волокна толщиной 400 и длиной 600 нм, на поверхность которых наносится пленка из полимера р(DMA-co-MEA), которая позволила авторам существенно (почти в 15 раз) увеличить силу адгезии как к сухой, так и к влажной поверхности.

Адгезивное покрытие для контактных поверхностей ползающих и шагающих микророботов. Использование сухих адгезивов существенным образом расширяет функциональные возможности этих устройств. Контактные покрытия с такими адгезивами позволят микророботам передвигаться по вертикальным поверхностям, преодолевать любые препятствия и легко перемещаться в пространствах с ограниченным объемом (трубопроводы, коммуникационные каналы и т. д.) [44—47]. Кроме этого, по сравнению с роботами, использующими другие типы крепления, существенно упрощается конструкция и масса устройства [45].

Данные роботы могут применяться для инспектирования радиационно и химически опасных объектов, для работы в условиях космоса, для проверки цистерн с горюче-смазочными материалами, для очистки и покраски стен, для исследования внутренней поверхности разного рода трубопроводов.

Начиная с 2004 г. ряд исследователей предложили концепцию микроробота для наземного и космического применения [47—52]. Были созданы прототипы различных конструкций. Для контактных поверхностей авторы [50, 53] предлагали использовать микроструктурированный ПДМС-материал. Авторы [48] для робота Wallbot предлагали использовать изготовленную по описанной в [25] технологии микроструктурированную поверхность с полиуретановыми волокнами диаметром 4...25 мкм с отношением размеров 10:1.



Рис. 6. Схема изготовления пленки Geckel [44]



Рис. 7. Миниатюрный робот Stickybot [57]

Daltorio и соавторы [54, 55] использовали пленку Gecko Nanoplast в конструкции робота Mini-Whegs7.

Исследователями из Стенфордского университета был создан миниатюрный робот Stickybot (рис. 7), имеющий массу 370 г, способный двигаться со скоростью 4 см/с [56]. В качестве контактной поверхности используется микроструктурированная поверхность, изготовленная из полиуретана.

Захваты манипуляторов на основе адгезивов. Сухие адгезивы можно применять в качестве покрытия для захватов манипуляторов, используемых для перемещения различного рода грузов на линиях автоматической сборки,

упаковки и т. п.

В этом случае материал должен обеспечить надежное крепление груза и его легкое отсоединение после завершения процесса транспортировки. Таким образом, необходимо покрытие с управляемой адгезией. Важным параметром, позволяющим оценивать эффективность этих устройств, является соотношение силы, удерживающей груз, к силе, необходимой для того, чтобы освободить от него контактную площадку.

В работе [57] представлено покрытие из полиуретанакрилата площадью 25 см², которое использовалось для транспортировки жидкокристаллических матриц размером 47,5 × 37,5 см. Соотношение сил в данном случае составляло до 10:1. В данном случае изготавливается двухуровневая иерархическая структура. Переключение адгезивных свойств было обеспечено использованием наклонных волокон. Максимальная сила отрыва наблюдается, когда волокна расположены параллельно к прикрепляемой поверхности, минимальная — при наклонном положении. Механизм прикрепления и отсоединения продемонстрирован на рис. 8.

В работе [58] описано использование манипуляторов с контактной поверхностью из сухих адгезивов для перемещения кремниевых пластин. Применялся микроструктурированный материал, содержащий грибовидные волокна, изготовленные из полиуретана. Соотношение сил достигало значений 15:1.

Bae, Kim и Suh в [59] для использования в качестве манипулятора применили усовершенствованную микроструктурированную поверхность. После получения микроволокон из ПДМС структуру помещали в нанесенный на подложку слой жидкого полимера. После извлечения его капли оставались на вершинах волокон. Затем данная структура прижималась к подложке, в результате получались волокна, соединенные между собой полимерными мостиками. Полученный материал продемонстрировал хорошую адгезию, сила которой достигала 30 H/см², и возможность легкого отсоединения. Устройство функционирует в двух режимах: "прикрепления" и "отрыва". Структура закрепляется на перемещаемой платформе. При "прикреплении" она равномерно прижимается к поверхности и имеет место максимальная сила адгезии. В режиме "отрыва" платформа со структурой постепенно поднимается с одного края. В данном случае, как и у геккона, ворсинки отрываются от поверхности



Рис. 8. Анализ адгезии наклонных нановолокон. Изменение угла наклона волокон при присоединении манипулятора к поверхности перемещаемого объекта (*a*), его отсоединении (δ) и график зависимости критической силы отрыва (F_p) от угла наклона (δ) [58]

последовательно, и манипулятор легко освобождается от груза.

Перспективным представляется использование сухих адгезивных материалов для изготовления микро- и наноманипуляторов, применяемых в технологии МЭМС. По сравнению с традиционными манипуляторами они имеют меньшие размеры, обеспечивают аккуратную и бережную микросборку. В работе [60] для этих целей был изготовлен микроструктурированный материал, содержащий наклоненные на 20° полиуретановые волокна 35 мкм в диаметре и 99 мкм высотой. Авторы с помощью изготовленной ими структуры перемещали кремниевые пластинки размером 100 × 100 × 3 мкм, показав таким образом возможность использования данного устройства в качестве микроманипулятора.

Адгезивные поверхности в медицине. Перспективным представляется использование адгезивных материалов в медицине. В работах [61, 62] исследуется возможность использования сухих адгезивов, изготовленных из ПДМС, в качестве перевязочного материала (пластыря). Авторы отмечают следующие преимущества данного покрытия: доступ воздуха к ране, легкость удаления (не оставляет следов пластыря и раздражения на коже). Недостаточной, по сравнению с традиционными перевязочными материалами, является прочность адгезии нового материала. Улучшение данного параметра является предметом дальнейших исследований.

В работе [63] Mahdavi и соавторы описали наноструктурированный материал на основе полимера полиглицерол — *со* — себакат акрилат (polyglycerol — *со* — sebacate acrylate). Данный материал является биосовместимым и биодеградируемым. Эти свойства позволяют использовать его в качестве медицинского герметика (клея для ран) или шовного материала.

Еще одним медицинским применением биомиметических адгезивных материалов могут быть системы доставки лекарственных препаратов в организм человека. В работе [64] авторы утверждают, что стеклянные шарики, покрытые слоем кремниевых нанотрубок, обладают существенно более высокой адгезией к слизистой оболочке, чем неструктурированные объекты. Данное качество является важным не только для систем доставки лекарств, но и для эндоскопических приборов, позволяя сделать их более комфортными и менее травмирующими для пациентов. Исследования, направленные на разработку материалов для данного направления, проводились авторами [65, 66], установившими, что помимо хороших адгезивных свойств микроструктурированный материал взаимодействует со слизистой оболочкой, не влияя на эпителиальную ткань.



Рис. 9. Прототип видеокапсулы для медицинских исследований [67]: А — корпус; В — манипулятор; С — шкив; D — адгезивное покрытие

В настоящее время одним из направлений разработки неинвазивных методик диагностики является использование видеокапсулы. Ведутся разработки миниатюрных роботов, транспортирующих данное устройство и использующих в своей конструкции сухие адгезивы [66—70]. Авторы работы [67] предлагают применять микроструктурированную поверхность, изготовленную с использованием ПДМС для контактных площадок манипуляторов таких роботов. Микроволокна имеют длину и диаметр ≈140 мкм. Прототип данного устройства представлен на рис. 9.

Заключение

В настоящее время разработка и производство сухих адгезивов является крайне перспективной и бурно развивающейся областью науки и технологий. За последние годы достигнут существенный прогресс в производстве данного типа материалов и совершенствовании их свойств. Получены образцы, по силе адгезии превосходящие природный прототип — лапки геккона. В институте физики полупроводников им. А. В. Ржанова СО РАН с использованием микро- и наноштамповой литографии получены пленки, имеющие силу адгезии 15 H/см² и выдерживающие сотни циклов прилипания/от-крепления без изменения своих свойств.

Постоянно расширяется область применения геккон-адгезивов, улучшаются их характеристики, создаются прототипы устройств, где они используются. Увеличивается список продуктов, представленных на рынке. В настоящее время это преимущественно липкие ленты, но уже разрабатывается и апробируется ряд устройств (микророботы, манипуляторы и т. д.) в различных областях технологии с использованием сухих адгезивов. Анализ литературных данных и коммерчески доступных продуктов показывает, что в настоящее время наиболее эффективным для производства сухих адгезивов, имеющих перспективы практического применения, является метод штамповой микро- и нанолитографии с использованием полимерных материалов.

Основной задачей текущего момента является, конечно, дальнейшее улучшение адгезивных параметров материалов, а также совершенствование возможностей обратимой адгезии, что является крайне важным для практического применения. Актуальной задачей является, несомненно, создание стандартизированной методики измерения, которая позволит более адекватно оценивать качество материалов, полученных различными исследовательскими группами.

Работа выполнена в рамках государственного контракта ГК 14.513.12.0008.

Список литературы

1. **Hiller U.** Untersuchungen zum Feinbau und zur Funktion der Haftborsten von Reptilien // Zeitschrift für morphologie der Tiere. 1968. V. 62, N 4. P. 307–362.

2. Hiller U., Blaschke R. Zum Haftproblem der Gecko-Füsse // Naturwissenschaften. 1967. V. 54, N 13. P. 344–344.

3. **Autumn K.** et al. Evidence for van der Waals adhesion in gecko setae // Proceedings of the National Academy of Sciences. 2002. V. 99, N 19. P. 12252–12256.

4. Autumn K., Peattie A. M. Mechanisms of adhesion in geckos // Integrative and Comparative Biology. 2002. V. 42, N 6. P. 1081–1090.

5. Hansen W. R., Autumn K. Evidence for self-cleaning in gecko setae // Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America. 2005. V. 102, N 2. P. 385–389.

6. Autumn K. et al. Dynamics of geckos running vertically // Journal of experimental biology. 2006. V. 209, N 2. P. 260–272.

7. Johnson K. L., Kendall K., Roberts A. D. Surface energy and the contact of elastic solids // Proceedings of the Royal Society of London. A. Mathematical and Physical Sciences. 1971. V. 324, N 1558. P. 301–313.

8. Arzt E., Gorb S., Spolenak R. From micro to nano contacts in biological attachment devices // Proceedings of the National Academy of Sciences. 2003. V. 100, N 19. P. 10603–10606.

9. Geim A. K. et al. Microfabricated adhesive mimicking gecko foot-hair // Nature materials. 2003. V. 2, N 7. P. 461–463.

10. Sitti M., Fearing R. S. Synthetic gecko foot-hair micro/nano- structures as dry adhesives // Journal of Adhesion Science and Technology. 2003. V. 17, N 8. P. 1055–1073.

11. **Majidi C., Groff R., Fearing R.** Clumping and packing of hair arrays manufactured by nanocasting // Proc. ASME IMECE. 2004. V. 62142.

12. **Jin M.** et al. Superhydrophobic aligned polystyrene nanotube films with high adhesive force // Advanced Materials. 2005. V. 17, N 16. P. 1977–1981.

13. **Kim D. S.** et al. Replication of high-aspect-ratio nanopillar array for biomimetic gecko foot-hair prototype by UV nano embossing with anodic aluminum oxide mold // Microsystem Technologies. 2007. V. 13, N 5–6. P. 601–606.

14. **Qu L., Dai L.** Gecko-Foot-Mimetic aligned single-walled carbon nanotube dry adhesives with unique electrical and thermal properties // Advanced Materials. 2007. V. 19. P. 3844—3849.

15. Ge L., Sethi S., Ci L. et al. Carbon nanotube-based synthetic gecko tapes // Proceedings of the National Academy of Sciences. 2007. V. 104, N 26. P. 10792–10795.

16. **Zhao Y., Tong T., Delzeit L.** et al. Interfacial energy and strength of multiwalled-carbon-nanotube-based dry adhesive // Journal of Vacuum Science & Technology B: Microelectronics and Nanometer Structures. 2006. V. 24, N 1. P. 331–335.

17. **Maeno Y., Nakayama Y.** Geckolike high shear strength by carbon nanotube fiber adhesives // Applied Physics Letters. 2009. V. 94, N 1. P. 012103-012103-3.

18. Wirth C. T., Hofmann S., Robertson J. Surface properties of vertically aligned carbon nanotube arrays // Diamond and Related Materials. 2008. V. 17, N 7. P. 1518–1524.

19. Whitesides G. M. et al. Soft lithography in biology and biochemistry // Annual review of biomedical engineering. 2001. V. 3, N 1. P. 335–373.

20. Xia Y., Whitesides G. M. Soft lithography // Annual review of materials science. 1998. V. 28, N 1. P. 153–184.

21. **Reddy S., Arzt E., del Campo A.** Bioinspired surfaces with switchable adhesion // Advanced Materials. 2007. V. 19, N 22. P. 3833–3837.

22. **Yoon E. S.** et al. Tribological properties of bio-mimetic nano-patterned polymeric surfaces on silicon wafer // Tribology Letters. 2006. V. 21, N 1. P. 31–37.

23. Jeong H. E., Suh K. Y. Nanohairs and nanotubes: Efficient structural elements for gecko-inspired artificial dry adhesives // Nano Today. 2009. V. 4, N 4. P. 335–346.

24. Lamblet M. et al. Adhesion enhancement through micropatterning at polydimethylsiloxane-acrylic adhesive interfaces // Langmuir. 2007. V. 23, N 13. P. 6966–6974.

25. Aksak B., Murphy M. P., Sitti M. Adhesion of biologically inspired vertical and angled polymer microfiber arrays // Lang-muir. 2007. V. 23, N 6. P. 3322–3332.

26. Greiner C., del Campo A., Arzt E. Adhesion of bioinspired micropatterned surfaces: effects of pillar radius, aspect ratio, and preload // Langmuir. 2007. V. 23, N 7. P. 3495–3502.

27. **Murphy M. P., Aksak B., Sitti M.** Gecko – Inspired Directional and Controllable Adhesion // Small. 2009. V. 5, N 2. P. 170–175.

28. **Kehagias N.** et al. Three-dimensional polymer structures fabricated by reversal ultraviolet-curing imprint lithography // Journal of Vacuum Science & Technology B: Microelectronics and Nanometer Structures. 2005. V. 23, N 6. P. 2954–2957.

29. Chary S., Tamelier J., Turner K. A microfabricated geckoinspired controllable and reusable dry adhesive // Smart Materials and Structures. 2013. V. 22, N 2. P. 025013.

30. **Pokroy B.** et al. Fabrication of bioinspired actuated nanostructures with arbitrary geometry and stiffness // Advanced Materials. 2009. V. 21, N 4. P. 463–469.

31. **Reddy S., Arzt E., del Campo A.** Bioinspired surfaces with switchable adhesion // Advanced Materials. 2007. V. 19, N 22. P. 3833–3837.

32. **Del Campo A., Greiner C.** SU-8: a photoresist for high-aspect-ratio and 3D submicron lithography // Journal of Micromechanics and Microengineering. 2007. V. 17, N 6. P. R81.

33. Greiner C., Arzt E., del Campo A. Hierarchical Gecko — Like Adhesives // Advanced Materials. 2009. V. 21. № 4. P. 479–482.

34. **Kustandi T. S.** et al. Fabrication of a gecko-like hierarchical fibril array using a bonded porous alumina template // Journal of Micromechanics and Microengineering. 2007. V. 17, N 10. P. 75–81.

35. **Murphy M. P., Kim S., Sitti M.** Enhanced adhesion by gecko-inspired hierarchical fibrillar adhesives // ACS applied materials & interfaces. 2009. V. 1, N 4. P. 849–855.

36. **Murphy M. P., Aksak B., Sitti M.** Adhesion and anisotropic friction enhancements of angled heterogeneous micro-fiber arrays with spherical and spatula tips // Journal of Adhesion Science and Technology. 2007. V. 21, N 12–13. P. 1281–1296.

37. **Jeong H. E.** et al. Nanoengineered multiscale hierarchical structures with tailored wetting properties // Langmuir. 2006. V. 22, N 4. P. 1640–1645.

38. del Campo A., Greiner C., Arzt E. Contact shape controls adhesion of bioinspired fibrillar surfaces // Langmuir. 2007. V. 23, N 20. P. 10235–10243.

39. **del Campo A.** et al. Patterned surfaces with pillars with controlled 3D tip geometry mimicking bioattachment devices // Advanced Materials. 2007. V. 19, N 15. P. 1973–1977.

40. Varenberg M., Peressadko A., Gorb S. et al. Advanced testing of adhesion and friction with a microtribometer // Review of scientific instruments. 2006. V. 77, N 6. P. 066105–066105-3.

41. **Cheung E., Sitti M.** Adhesion of biologically inspired oilcoated polymer micropillars // Journal of Adhesion Science and Technology. 2008. V. 22, N 5–6. P. 569–589.

42. **Glassmaker N. J., Jagota A., Hui C. Y.** Adhesion enhancement in a biomimetic fibrillar interface // Acta Biomaterialia. 2005. V. 1, N 4. P. 367–375.

43. **Pfaff H.** Synthesis and adhesion of biomimetic contact elements. Ph. D. Thesis. 2006.

44. Lee H., Lee B. P., Messersmith P. B. A reversible wet/dry adhesive inspired by mussels and geckos // Nature. 2007. V. 448, N 7151. P. 338–341.

45. Autumn K. Gecko adhesion: structure, function, and applications // MRS bulletin. 2007. V. 32, N 06. P. 473–478.

46. **Чащухин В. Г.** Сухой адгезионный материал для схватов в робототехнике // Нано- и микросистемная техника. 2009. № 2. С. 13—18.

47. **Unver O.** et al. Geckobot: a gecko inspired climbing robot using elastomer adhesives // Robotics and Automation, 2006. ICRA 2006. Proceedings 2006 IEEE International Conference on. IEEE, 2006. P. 2329–2335.

48. Aksak B., Murphy M. P., Sitti M. Gecko inspired microfibrillar adhesives for wall climbing robots on micro/nanoscale rough surfaces // Robotics and Automation, 2008. ICRA 2008. IEEE International Conference on. IEEE, 2008. P. 3058–3063.

49. Autumn K., Liang Y., Hsieh T. et al. Adhesive force of a single gecko foot-hair // Nature. 2000. V. 405, N 6787. P. 681–685.

50. Menon C., Murphy M., Shah G. et al. WaalBots for Space applications // 55th IAC Conference, Vancouver, Canada. 2004.

51. **Murphy M. P.** et al. Waalbot II: Adhesion recovery and improved performance of a climbing robot using fibrillar adhesives // The International Journal of Robotics Research. 2011. V. 30, N 1. P. 118–133.

52. Santos D., Spenko M., Parness A. et al. Directional adhesion for climbing: theoretical and practical considerations // Journal of Adhesion Science and Technology. 2007. V. 21, N 12–13. P. 1317–1341.

53. **Yu J., Chary S., Das S.** et al. Gecko-Inspired Dry Adhesive for Robotic Applications // Advanced Functional Materials. 2011. V. 21, N 16. P. 3010–3018.

54. **Daltorio K. A., Gorb S., Peressadko A.** et al. A robot that climbs walls using micro-structured polymer feet // Climbing and Walking Robots. Springer Berlin Heidelberg, 2006. P. 131–138.

55. **Daltorio K. A., Gorb S., Peressadko A.** et al. Microstructured polymer adhesive feet for climbing robots // MRS bulletin. 2007. V. 32, N 06. P. 504–508.

56. Kim S., Spenko M., Trujillo S. et al. Smooth vertical surface climbing with directional adhesion // Robotics, IEEE Transactions on. 2008. V. 24, N 1. P. 65–74.

57. Jeong H. E., Lee J.-K., Kim H. N. et al. A nontransferring dry adhesive with hierarchical polymer nanohairs // Proceedings of the National Academy of Sciences. 2009. V. 106, N 14. P. 5639–5644.

58. **Zhou M., Tian Y., Sameoto D.** et al. Controllable Interfacial Adhesion Applied to Transfer Light and Fragile Objects by Using Gecko Inspired Mushroom-Shaped Pillar Surface // ACS applied materials & interfaces. 2013. V. 5, N 20. P. 10137–10144.

59. **Bae W. G., Kim D., Suh K. Y.** Instantly switchable adhesion of bridged fibrillar adhesive via gecko-inspired detachment mechanism and its application to a transportation system // Nanoscale. 2013. V. 5, N 23. P. 11876–11884.

60. **Menguc Y., Yang S. Y., Kim S.** et al. Gecko-Inspired Controllable Adhesive Structures Applied to Micromanipulation // Advanced Functional Materials. 2012. V. 22, N 6. P. 1246–1254.

61. **Kwak M. K., Jeong H. E., Suh K. Y.** Rational design and enhanced biocompatibility of a dry adhesive medical skin patch // Advanced Materials. 2011. V. 23, N 34. P. 3949–3953.

62. **Karp J. M., Langer R.** Dry solution to a sticky problem // Nature. 2011. V. 477, N 7362. P. 42.

63. **Mahdavi A., Ferreira L., Sundback C.** et al. A biodegradable and biocompatible gecko-inspired tissue adhesive // Proceedings of the National Academy of Sciences. 2008. V. 105, N 7. P. 2307–2312.

64. Fischer K. E., Aleman B. J., Tao S. L. et al. Biomimetic nanowire coatings for next generation adhesive drug delivery systems // Nano letters. 2009. V. 9, N 2. P. 716–720.

65. **Dodou D., del Campo A., Arztarzt E.** Mucoadhesive micropatterns for enhanced grip // Engineering in Medicine and Biology Society, 2007. EMBS 2007. 29th Annual International Conference of the IEEE. IEEE, 2007. P. 1457–1462.

66. **Glass P., Cheung E., Sitti M.** A legged anchoring mechanism for capsule endoscopes using micropatterned adhesives // Biomedical Engineering, IEEE Transactions on. 2008. V. 55, N 12. P. 2759–2767.

67. **Menciassi A., Park J. H., Lee S.** et al. Robotic solutions and mechanisms for a semi-autonomous endoscope // Intelligent Robots and Systems, 2002. IEEE/RSJ International Conference on. IEEE, 2002. V. 2. P. 1379–1384.

68. Lee Y. P. et al. Locomotive mechanism design and fabrication of biomimetic micro robot using shape memory alloy // Robotics and Automation, 2004. Proceedings. ICRA'04. 2004 IEEE International Conference on. IEEE, 2004. V. 5. P. 5007–5012.

69. **Karagozler M. E.** et al. Miniature endoscopic capsule robot using biomimetic micro-patterned adhesives // Biomedical Robotics and Biomechatronics, 2006. BioRob 2006. The First IEEE/RAS-EMBS International Conference on. IEEE, 2006. P. 105–111.

70. **Cheun E., Karagozler E., Park S.** et al. A new endoscopic microcapsule robot using beetle inspired microfibrillar adhesives // Advanced Intelligent Mechatronics. Proceedings, 2005 IEEE/ASME International Conference on. IEEE, 2005. P. 551–557.

УДК 53.087:537.621.2

Г. Д. Демин¹, аспирант, **Н. А. Дюжев²**, канд. физ.-мат. наук, вед. науч. сотр.,

А. Ф. Попков¹, д-р физ.-мат. наук, проф., М. Ю. Чиненков¹, канд. физ.-мат. наук, ст. науч. сотр.

¹ Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего профессионального образования "Национальный исследовательский университет "МИЭТ", г. Москва

² Открытое акционерное общество "Зеленоградский инновационно-технологический центр" (ОАО "ЗИТЦ"), г. Москва

СПИН-ПОЛЯРИЗОВАННАЯ ТОКОВАЯ ЭМИССИЯ В ВАКУУМ И ПЕРЕКЛЮЧЕНИЕ МАГНИТНОГО СОСТОЯНИЯ ТОНКИХ НАНООСТРОВКОВЫХ ПЛЕНОК¹

Поступила в редакцию 11.11.2013

Исследуются особенности спин-поляризованного туннелирования через вакуумный зазор при инжекции электронов с магнитного покрытия катода на поверхность магнитных наноостровковых структур в режимах слабой и сильной полевой эмиссии. Обнаружено сильное влияние работы выхода и спинового расщепления магнитного катода на плотность протекающего туннельного тока, а также установлено существенное изменение характера спин-зависимого туннелирования при высоких напряжениях. Полученные теоретические оценки могут быть в дальнейшем использованы для реализации перемагничивания током спинового состояния магнитных наноостровковых пленок и разработки нового поколения высокоплотных запоминающих устройств, основанных на токовом переносе спина.

Ключевые слова: спин-поляризованное туннелирование, вакуумный зазор, токовое перемагничивание, магнитная наноостровковая структура, туннельное магнитосопротивление, туннельная спиновая поляризация

G. D. Demin, N. A. Dyuzhev, A. F. Popkov, M. Yu. Chinenkov

SPIN-POLARIZED FIELD EMISSION IN VACUUM AND CURRENT-INDUCED MAGNETIZATION SWITCHING OF NANO-ISLAND MAGNETIC THIN FILMS

In this work the specific features were analyzed of the characteristics of the spin-polarized tunneling through a vacuum gap by electrons injected from the probe tip with magnetic coating into the magnetic nano-islands both in the weak and strong field emission regimes. A significant influence of the work function and spin splitting of the magnetic cathode on the averaged value of tunneling current density was discovered. Also it was demonstrated that the behavior of the spin-dependent tunneling changes considerably when high voltages are applied. The obtained theoretical estimates can be subsequently used for realization of the current-driven magnetization reversal of the magnetic nano-island films and further development of a new generation of high-density storage devices based on spin transfer.

Keywords: spin-polarized tunneling, vacuum gap, current-driven magnetization reversal, magnetic nano-island structure, tunneling magnetoresistance, tunneling spin polarization

Введение

Исследованию спин-поляризованного транспорта в магнитных туннельных структурах за последние несколько лет посвящено большое число как теоретических [1, 2], так и экспериментальных [3, 4] работ, что связано с ожидаемыми перспективами создания новых энергонезависимых устройств памяти на их основе. Концепция записи в таких устройствах заключается в переключении спинового состояния магнитного слоя под действием туннельного тока заданной спиновой ориентации. Главенствующим явлением, заложенным в данную концепцию, является эффект передачи спинового вращательного момента коллективизированными *s*-электронами проводимости к локализованной магнитоупорядоченной подсистеме *d*-электронов, что может привести к неустойчивости усредненной намагниченности слоя при определенных значениях напряжения, прикладываемого к туннельной структуре [5].

В качестве туннельных структур, как правило, используются различные конфигурации чередующихся магнитных и немагнитных слоев, сформированные на базе трехслойного магнитного туннельного перехода (МТП). Такой МТП состоит из двух ферромагнитных электродов, разделенных немагнитной туннельной прослойкой. Один магнитный слой считается закрепленным и служит для задания поляризации туннельного тока (поля-

¹ Работа выполнена при поддержке РФФИ (проект 13-07-12405).

ризатор), другой магнитный слой, в свою очередь, обладает малой коэрцитивной силой (свободный магнитный слой), что способствует возможности переориентации его спинового состояния.

Высокие значения туннельного магнитосопротивления (ТМС) получены на МТП с диэлектрической туннельной прослойкой из MgO [3], что делает их основными кандидатами на роль функционального элемента магниторезистивной ячейки памяти, претендующей на роль универсальной. Однако здесь существует проблема, связанная с необходимостью понижения пороговых токов переключения, достигающих значений плотности в диапазоне $10^6...10^8$ A/см², что приводит к значительному тепловому разогреву всей туннельной структуры. Это является критичным условием при создании высокоплотных запоминающих устройств нового поколения в процессе масштабирования элементов. В связи с этим необходимо рассмотреть альтернативные технологические и конструктивные решения и провести детальный анализ механизмов спин-поляризованного транспорта.

Туннельные структуры на базе МТП с вакуумным зазором представляются одним из привлекательных путей изучения и возможного решения этих проблем в силу ряда причин. Так, для повышения плотности записи дисковых запоминающих устройств вплоть до 10 Тбит/дюйм² рассматривается возможность термоассистированного переключения магнитных наноостровков с сопутствующим оптическим разогревом [6]. Сравнительно недавно были проведены уникальные эксперименты по переключению магнитных наноостровковых структур Fe/W через вакуумный зазор [7], что стимулирует теоретические исследования в этом направлении. Вакуумные туннельные структуры позволяют акцентировать внимание на рассмотрении особенностей переноса спина в отсутствие влияния дополнительных эффектов на интерфейсах слоев, что является критичным для структур с диэлектрической прослойкой. Кроме того, использование вакуумного зазора вместо диэлектрического слоя дает возможность исследовать новую физику спинтуннельных магнитных явлений в режиме сильной полевой эмиссии при напряжениях выше порога пробоя диэлектрика.

В настоящей работе в рамках приближения свободных электронов рассматриваются спин-туннельные явления, протекающие в вакуумных туннельных структурах при инжекции электронов с заданной ориентацией спина с магнитного покрытия кантилевера на поверхность магнитного наноостровка с перпендикулярной анизотропией формы. Учитывается эффект передачи спинового вращательного момента спин-поляризованными электронами при туннелировании через вакуумный зазор в режимах слабой и сильной полевой эмиссии.

Модель спинового транспорта в вакуумной туннельной структуре

Рассматривается магнитная система, состоящая из зондового наконечника кантилевера с нанометровым магнитным покрытием и магнитной наноостровковой структурой, которые разделены между собой сверхтонким вакуумным зазором, как показано на рис. 1. Полагаем, что наноостровковая структура имеет поперечное сечение в форме эллипса.

Расчет спинового транспорта в вакуумной туннельной структуре проводили в рамках баллистического приближения модели Зоммерфельда для свободных электронов проводимости, туннелирующих из магнитного слоя поляризатора в свободный магнитный слой, с учетом обменного спинового расщепления энергетических уровней в магнитных слоях. Рассматривалось приближение треугольного туннельного барьера (рис. 2).

Для решения задачи использовали одноэлектронное уравнение Шрёдингера распространения потока электронов вдоль продольной оси *z* (см. рис. 1) для спинорных волновых функций $\Psi_i = (\psi_{\uparrow}, \psi_{\downarrow})$, описывающих состояние электрона со спином $\sigma = \uparrow, \downarrow$ с учетом направления оси квантования в заданном *i*-м слое:

$$\hat{H}_z \Psi_i = E_z \Psi_i. \tag{1}$$

В уравнении (1) продольная *z*-компонента энергии электрона E_z соответствует выбору гамильтониана \hat{H}_z следующего вида:

$$\hat{H}_{z} = -\frac{\hbar^{2}}{2m_{i}^{*}}\frac{d^{2}}{dz^{2}} + U_{i}(z) - h_{S}(z)\cdot\hat{\sigma}, \qquad (2)$$



Рис. 1. Общий вид магнитной системы. Большая стрелка — направление поляризации магнитного покрытия, малые стрелки начальная ориентация намагниченности в магнитной наноостровковой структуре. Ось z соответствует направлению туннелирования электронов, ось x расположена перпендикулярно оси z



Рис. 2. Энергетический профиль U(z) одномерной модели спинзависимого туннелирования из магнитного катода (C) в магнитный анод (A) через треугольный туннельный барьер (B): M_P — намагниченность поляризующего магнитного покрытия, M — намагниченность свободного слоя наноостровковой пленки. При напряжении V > 0 магнитным катодом является магнитное покрытие зондового наконечника, а магнитным анодом — магнитная наноостровковая структура

где \hbar — постоянная Планка; m_i^* — эффективная масса в *i*-м слое (*i* = *C*, *B*, *A*); — $h_S(z) \cdot \hat{\sigma}$ — внутренняя обменная энергия; $h_S(z)$ — молекулярное поле в магнитном слое; $|h_S(z)| = 0,5\Delta_i$; Δ_i — величина спинового расщепления в магнитном слое (*i* = *C*, *A* для катода и анода соответственно); $\hat{\sigma}$ — оператор спина с собственными значениями $\sigma_S = \pm 1$ для спина электрона $\sigma_S = \uparrow, \downarrow$. Энергетический профиль $U_i(z)$ туннельной структуры (см. рис. 2) определяется соотношением

$$U_{i}(z) = \begin{cases} 0, \ z < 0; \\ E_{FC} + \phi_{C} - (\Delta \phi + eV)z/d, \ 0 \le z < d; \\ -eV, \ z \ge d, \end{cases}$$
(3)

где E_{FC} — уровень Ферми в катоде; ϕ_C — высота барьера для магнитного катода C; $\Delta \phi = \phi_C - \phi_A$ наклон барьера B при напряжении V = 0; ϕ_A — высота барьера для магнитного анода A; V — приложенное к переходу напряжение, d — толщина туннельного слоя B. Для данного профиля полагается, что нулевое положение по оси z относится к вершине магнитного покрытия (см. рис. 1), а нулевой уровень энергии располагается в середине между расщепленными зонами проводимости для электронов со спином \uparrow и со спином \downarrow в слое катода C. Далее проводится расчет коэффициентов отражения и прохождения барьера после сшивки волновых функций и их производных на интерфейсах структуры. Поскольку в данной модели предусматривается неколлинеарная взаимная ориентация векторов намагниченностей катода C и анода Aсогласно рис. 2, то также необходимо учитывать поворот оси квантования на угол θ , образованный этими векторами, в слое анода A.

Для вычисления плотности туннельного тока используется стандартное квантовомеханическое выражение потока электронов, протуннелировавших в анодный магнитный слой:

$$j^{A} = -\frac{i\hbar}{2m_{A}^{*}}(\Psi^{A^{*}}\nabla\Psi^{A} - \Psi^{A}\nabla\Psi^{A^{*}}), \qquad (4)$$

где $\Psi^{A} = (\psi_{\uparrow}^{A}, \psi_{\downarrow}^{A}) -$ спинорная волновая функция анода; $\psi_{\uparrow}^{A} = T_{\sigma\uparrow} \exp(ik_{\uparrow z}^{A}z), \psi_{\downarrow}^{A} = T_{\sigma\downarrow} \exp(ik_{\downarrow z}^{A}z) -$ компоненты спинора Ψ^{A} ; $T_{\sigma\sigma'} -$ коэффициент прохождения барьера; $k_{\sigma'z}^{A} = \sqrt{2m_{A}^{*}(E_{z} - E_{\sigma'b}^{A})}/\hbar -$ волновой вектор анода; $E_{\sigma'b}^{A} = -\sigma' \cdot \Delta_{A} - eV + E_{FC} - E_{FA}$ – уровень дна зоны проводимости в аноде; E_{FA} и E_{FC} уровни Ферми в аноде и катоде соответственно.

При этом $\sigma = \pm 1$, $\sigma' = \pm 1$ — собственные значения спиновых состояний электрона $\sigma = \uparrow, \downarrow$, $\sigma' = \uparrow, \downarrow$ до и после прохождения туннельного барьера структуры соответственно.

Далее проводится термодинамическое усреднение (4) с учетом функции распределения Ферми $f_{\sigma C}(E), f_{\sigma'A}(E)$ энергетических состояний катода и анода при нулевой температуре T = 0 К, что дает выражение для плотности тока по спин-зависимым $\sigma \rightarrow \sigma'$ каналам туннелирования в соответствии с эквивалентной схемой МТП из токовой модели Слончевского, представленной на рис. 3:

$$\langle J_e^{\sigma\sigma'} \rangle = \frac{(m_C^*)^2}{4\pi^2 \hbar^4} \int_0^{+\infty} \int_0^{+\infty} \frac{1}{k_{\sigma z}} j_e^{\sigma\sigma'C \to A} \times f_{\sigma C} (E - E_{FC}) (1 - f_{\sigma'A}(E - E_{FA} + eV)) dE_{\parallel} dE_z,$$
(5)

где
$$j_e^{\sigma\sigma'C \to A} = j_A = \frac{\hbar k_{\sigma z}^C}{m_C^*} |T_{\sigma\sigma'}|^2$$
,

 $k_{\sigma z}^{C} = \sqrt{2m_{C}^{*}(E_{z} - E_{\sigma b}^{C})}/\hbar$ — волновой вектор катода; $E_{\sigma b}^{C} = -\sigma \cdot \Delta_{C}$ — уровень дна зоны проводимости в катоде; E_{\parallel} — энергия электрона, соответствующая компоненте волнового вектора параллельно плос-



Рис. 3. Эквивалентная схема спинового переноса в МТП; $J_e^{\sigma\sigma'}$ туннельный ток заряда при переносе электрона по спиновому каналу с зоны проводимости магнитного катода C со спином $\sigma = \uparrow, \downarrow$ в зону проводимости магнитного анода A со спином $\sigma' = \uparrow, \downarrow$, где $J_{eC}^{\sigma} = J_e^{\sigma\uparrow} + J_e^{\sigma\downarrow}$, $J_{eA}^{\sigma'} = J_e^{\uparrow\sigma'} + J_e^{\downarrow\sigma'}$; V — напряжение на переходе [8]

кости интерфейса слоев, $E = E_z + E_{\parallel}, f_{\sigma C}(E) =$ = $(\mathbf{e}^{(E - E_{FC})/k_BT} + 1)^{-1}, f_{\sigma'A}(E) = (\mathbf{e}^{(E - E_{FA} + eV)/k_BT} + 1)^{-1}; k_B$ — постоянная Больцмана.

Таким образом, усредненная плотность туннельного тока описывается как сумма усредненных потоков электронов по всем спин-зависимым каналам туннелирования:

$$\langle J_e \rangle = \sum_{\sigma, \sigma'} \langle J_e^{\sigma \sigma'} \rangle,$$
 (6)

где $\sigma = \uparrow, \downarrow, \sigma' = \uparrow, \downarrow$ — спиновые состояния электрона до и после прохождения туннельного барьера структуры.

Были исследованы два основных параметра, характеризующие спин-зависимое туннелирование. Одним из них является коэффициент туннельного магнитосопротивления *TMR*, характеризующий разбаланс токов между параллельной (*P*) и антипараллельной (*AP*) конфигурациями туннельной структуры:

$$TMR = \frac{\langle J_e \rangle(\theta^P) - \langle J_e \rangle(\theta^{AP})}{\langle J_e \rangle(\theta^{AP})},$$
 (7)

где $\theta^P = 0^\circ$ и $\theta^{AP} = 180^\circ$ — углы взаимной ориентации векторов намагниченностей катода *C* и анода *A* для *P* и *AP* состояния соответственно.

Второй важный параметр — коэффициент туннельной спиновой поляризации *P*, отвечающий за соотношение между потоками электронов по спинзависимым каналам туннелирования с различным $\sigma = \uparrow u \sigma = \downarrow$ спиновым состоянием поляризации электронов:

$$P = \frac{(\langle J_e^{\uparrow\uparrow} \rangle + \langle J_e^{\uparrow\downarrow} \rangle) - (\langle J_e^{\downarrow\uparrow} \rangle + \langle J_e^{\downarrow\downarrow} \rangle)}{(\langle J_e^{\uparrow\uparrow} \rangle + \langle J_e^{\uparrow\downarrow} \rangle) + (\langle J_e^{\downarrow\uparrow} \rangle + \langle J_e^{\downarrow\downarrow} \rangle)}.$$
 (8)

Численные расчеты и обсуждение результатов

Так как режим сильной полевой эмиссии наступает при напряжениях $V \ge V_C = \phi_C$, то для вакуумных структур интересно рассмотреть ситуацию, когда напряжение, прикладываемое к острию магнитного зонда, будет равно $V = 5B = V_C$.

Будем полагать, что в качестве материала для магнитного покрытия кантилевера и магнитной наноостровковой структуры используется Со, а минимальная толщина туннельного слоя у вершины магнитного покрытия составляет d = 0,45 нм, что соответствует условиям эксперимента по измерению ТМС в аналогичных МТП с вакуумным зазором [9]. Предполагается, что отклонение туннелирующих электронов локальным магнитным полем зондового покрытия невелико при малых d, и ток распространяется в перпендикулярном направлении от катода к аноду.

Согласно вышеуказанным начальным условиям моделирования, в программном пакете COMSOL был проведен расчет распределения электрического поля Е вдоль линии, проходящей через вершину магнитного покрытия кантилевера параллельно плоскости магнитной наноостровковой структуры (см. рис. 1), результат которого представлен на рис. 4, а. Также для типичной параболической аппроксимации формы зондового наконечника, используемого в кантилеверах МСМ, в рамках решения квантовомеханической задачи спин-поляризованного туннелирования через вакуумный зазор проведена теоретическая оценка усредненной плотности туннельного тока $\langle J_e \rangle$ в поперечном сечении магнитной наноостровковой структуры в случае параллельной ($\theta = 0^{\circ}$), перпендикулярной $(\theta = 90^\circ)$ и антипараллельной $(\theta = 180^\circ)$ взаимной ориентации намагниченностей М и М_Р из рис. 2 (рис. 4, б).

В качестве основных параметров моделирования спинового транспорта были взяты значения, соответствующие трехслойному магнитному переходу кобальт—вакуум—кобальт: спиновое расшепление $\Delta_C = \Delta_A = 2,2$ эВ [10], высота барьера $\phi_C = \phi_A = 5$ эВ [11], уровень Ферми $E_{FC} = F_{FA} = 2,62$ эВ [10].

Из рис. 4 видно, что область токовой эмиссии более узкая, нежели область распределения напряженности электрического поля. При этом пик плотности тока достигает своего максимального значения при $\theta = 0^\circ$, минимального — при $\theta = 180^\circ$ и имеет промежуточное значение при $\theta = 90^\circ$, что отражает магниторезистивный эффект для МТП с вакуумным зазором.

На рис. 5 также показаны зависимости плотности туннельного тока $\langle J_e^P \rangle$ от работы выхода материала $\phi_C = \phi_A$ (при значении $\Delta_C = \Delta_A = 0,5$ эВ) и плотности туннельного тока $\langle J_e \rangle$ от обменного



Рис. 4. Распределение электрического поля *E* вблизи вершины магнитного покрытия катода (*a*) и усредненной плотности тока $\langle J_e \rangle$ в продольном срезе магнитной наноостровковой структуры (*б*) в зависимости от значения координаты вдоль оси Ох для взаимной ориентации намагниченностей $\theta = \{0^\circ, 90^\circ, 180^\circ\}$. На вставке показаны геометрические размеры острия зондового наконечника



Рис. 5. Зависимость плотности туннельного тока $\langle J_e \rangle$ (*a*) от работы выхода материала $\phi_C = \phi_A$ при спиновом расщеплении $\Delta_C = \Delta_A = 0,5$ эВ и (*б*) от спинового расщепления $\Delta_C = \Delta_A$ при работе выхода материала $\phi_C = \phi_A = 5$ эВ для взаимной ориентации намагниченностей $\theta = \{0^\circ, 90^\circ, 180^\circ\}$

спинового расщепления уровней $\Delta_C = \Delta_A$ (при значении $\phi_C = \phi_A = 5$ эВ) для взаимной ориентации $\theta = 0^\circ, \theta = 90^\circ, \theta = 180^\circ$ соответственно.

Из рис. 5, *а* следует, что в диапазоне значений работы выхода $\phi_C = 4...5$ эВ для МТП с вакуумным зазором плотность тока практически экспоненциально убывает с ростом ϕ_C при одновременном уменьшении различия между конфигурациями $\theta = 0^\circ$, $\theta = 90^\circ$ и $\theta = 180^\circ$ в силу роста числа электронов, туннелирующих выше уровня Ферми магнитного анодного слоя. Рис. 5, *б* иллюстрирует влияние увеличения спинового расщепления Δ_C в диапазоне значений, характерном для большинства

магнитных материалов, на расширение области перекрытия спиновых каналов, которое ведет к падению плотности тока и возрастанию различия между параллельной и антипараллельной конфигурацией МТП и, как следствие, значения туннельного магнитосопротивления.

Согласно аналитическим соотношениям из уравнений макроспиновой динамики [12] и выражениям для коэффициентов переноса спинового вращательного момента [8] проведем оценку пороговых токов переключения магнитных наноостровковых структур с перпендикулярной анизотропией при малых напряжениях на зазоре. Используем следующие параметры в соответствии с [13]: намагниченность Со $M_S \approx 1289$ кА/м, толщина наноостровковой структуры $d_F = 0,4$ нм, коэффициент затухания Гильберта $\alpha = 0,01$, туннельная спиновая поляризация P = 0,35 при нулевом напряжении для МТП с вакуумным зазором, поле магнитной анизотропии $H_K \approx 398$ кА/м. При этом будем иметь, что $\langle J_C^{P \to AP} \rangle = -5.1 \cdot 10^6 \text{ A/cm}^2,$ $< J_C^{AP \to P} > = 3,9 \cdot 10^6$ A/см², где $\langle J_C^{P \to AP} \rangle, \langle J_C^{AP \to P} \rangle -$ пороговые плотности токов, характеризующие переключение между параллельной (Р) и антипараллельной (АР) конфигурацией МТП.

Подобная упрощенная оценка показывает, что рассчитанные плотности тока соответствуют зна-

чениям 10⁶...10⁷ А/см², необходимым для переключения магнитного состояния, что дает основание полагать вероятной возможность экспериментального токового перемагничивания магнитных наноостровковых структур через вакуумный зазор. Ранее аналогичные работы были предприняты в научной группе проф. Вейзендангера с тепловой активацией переключения спинового состояния [7].

Для малого значения спинового расщепления $\Delta_C = \Delta_A = 0,5$ эВ в магнитном слое Со также получены зависимости туннельного магнитосопротивления и туннельной спиновой поляризации от на-



Рис. 6. Зависимость коэффициента *TMR* (*a*) и туннельной спиновой поляризации *P* (*б*) от напряжения *V* для взаимной ориентации намагниченностей $\theta = \{0^\circ, 90^\circ, 180^\circ\}$ при спиновом расщеплении $\Delta_C = \Delta_A = 0,5$ эВ в режимах слабой $V < V_C$ и сильной $V > V_C$ полевой эмиссии

пряжения, удовлетворяющие условиям как слабой, так и сильной полевой эмиссии.

При напряжениях $V > V_C$, характерных для перехода в режим сильной эмиссии (автоэмиссии), коэффициент *TMR* становится отрицательным, и для коэффициента спиновой поляризации *P* наблюдается преобладание антипараллельной ориентацие и намагниченностей над параллельной ориентацией, что прямо противоположно случаю малых напряжений. Это связано с изменением соотношения плотностей тока параллельной и антипараллельной конфигурации в области перехода от слабополевого к сильнополевому режиму эмиссии, что отмечается в других работах по данной тематике [14].

Рассчитанный коэффициент *TMR* (рис. 6, *a*) достигает своего максимального значения порядка 2 %, что находится в полном соответствии с экспериментами по измерению *TMR* в структурах с вакуумным зазором при малых напряжениях $V > V_C$ [9]. Полученные величины *P* (рис. 6, *б*) также согласуются с результатами теоретических расчетов спинового транспорта в МТП с вакуумным зазором в модели зонной структуры для приближения сильной связи [15].

Заключение

В рамках модели свободных электронов построена модель расчета параметров спинового транспорта в МТП с вакуумным зазором. Рассчитано распределение электрического поля и плотности тока для магнитной вакуумной структуры в случае перехода к режиму сильной эмиссии и учета параболической формы зондового наконечника при малых толщинах туннельного зазора. Описан вклад перекрытия спиновых каналов в процессы спинзависимого туннелирования при различных параметрах магнитной системы. Показано влияние спинового расщепления и работы выхода на плотность туннельного тока. Описаны зависимости от напряжения туннельного магнитосопротивления и туннельной спиновой поляризации в режиме как слабой, так и сильной эмиссии.

Показано, что полученные результаты по расчету туннельных токов хорошо согласуются с аналитическими формулами, описывающими пороговые токи переключения спинового состояния магнитной наноостровковой структуры при малых напряжениях, что может служить в качестве

предпосылки к экспериментальной реализации перемагничивания магнитных наноостровковых пленок через вакуумный зазор.

Работа выполнена при поддержке Минобрнауки РФ в рамках ФЦП "Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технологического комплекса России на 2007—2013 годы" ГК № 14.513.11.0132.

Список литературы

1. **Baraduc C., Chshiev M., and Dieny B.** Spintronic Phenomena: Giant Magnetoresistance, Tunnel Magnetoresistance and Spin Transfer Torque // Giant Magnetoresistance (GMR) Sensors. Smart Sensors, Measurement and Instrumentation. 2013. V. 6. P. 1–30.

2. Franz C., Czerner M., and Heliger C. Influence of the magnetic material on tunneling magnetoresistance and spintransfer torque in tunnel junctions: Ab initio studies // Phys. Rev. B. 2013. V. 88. P. 094421.

3. Yuasa S., and Djayaprawira D. D. Giant tunnel magnetoresistance in magnetic tunnel junctions with a crystalline Mgo (001) barrier // J. Phys. D: Appl. Phys. 2007. V. 40. P. R337–R354.

4. Kalitsov A., Zermatten P.-J., Bonell F., Gaudin G., Andrieu S., Tiusan C., et. al. Bias dependence of tunneling magnetoresistance in magnetic tunnel junctions with asymmetric barriers // J. Phys.: Condens. Matter. 2013. V. 25. P. 496005.

5. Manchon A., and Zhang S. Spin Torque Effects in Magnetic Systems: Theory // Handbook of Spin Transport and Magnetism. 2012. P. 157.

6. **Stipe B. C.** et. al. Magnetic recording at 1,5 Pb m⁻² using an integrated plasmonic antenna // Nature Photon. 2010. V. 4. P. 484.

7. Herzog G., Krause S., and Wiesendanger R. Heat assisted spin torque switching of quasistable nanomagnets across a vacuum gap // Appl. Phys. Lett. 2010. V. 96. P. 102505.

8. **Slonczewski J.** Current, torques and polarization factors in magnetic tunnel junctions // Phys. Rev. B. 2005. V. 71. P. 024411.

9. Wulfhekel W., Ding H. F., and Kirschner J. Tunneling magnetoresistance through a vacuum gap // J. Magn. Magn. Matter. 2002. V. 242. P. 47–52.

10. **Ogrodnik P., Wilczyński M., Świrkowicz R., and Barnaś J.** Spin transfer torque and magnetic dynamics in tunnel junctions // Phys. Rev. B. 2010. V. 82. P. 134412.

11. CRC Handbook on Chemistry and Physics. 2008.

12. Le Gall S., Cucchiara J., Gottwald, Berthelot C., Lambert C.-H., et. al. State diagram of nanopillar spin valves with perpendicular magnetic anisotropy // Phys. Rev. B. 2012. V. 86. P. 014419.

13. Wedekind S., Rodary G., Borme J., et. al. Switching fields of individual Co nanoislands // IEEE Trans. Magn. 2011. V. 47. P. 3351.

14. Feng G., van Dijken S., and Coey J. M. D. Influence of annealing on the bias voltage dependence of tunneling magnetoresistance in MgO double-barrier magnetic tunnel junctions with CoFeB electrodes // Appl. Phys. Lett. 2006. V. 89. P. 162501.

15. **Mathon J.** Theory of spin-dependent tunneling in magnetic tunnel junctions // J. Phys. D.: Appl. Phys. 2002. V. 35. P. 2437–2442.

УДК 621.383.8

Д. А. Заярский, аспирант, А. А. Невешкин, канд. техн. наук, доц.,

В. Б. Байбурин, д-р физ.-мат. наук, проф., зав. каф., **Ю. П. Слаповская**, канд. техн. наук, ассистент, Саратовский государственный технический университет имени Ю. А. Гагарина, г. Саратов, e-mail: nevaa@mail.ru

СОЗДАНИЕ МНОГОСЛОЙНЫХ СТРУКТУР НА ОСНОВЕ Alq₃ И ИССЛЕДОВАНИЕ ИХ СВОЙСТВ

Поступила в редакцию 12.11.2013

Приведена методика формирования тонкопленочных полимерных покрытий на основе три-8-оксихиналин алюминия (Alq₃) и параметры оптимального режима нанесения, при котором толщина покрытий находится в пределах 100 нм. Создана многослойная тонкопленочная МДМ-структура на основе Alq₃ и исследованы ее электрофизические свойства.

Ключевые слова: полимерные покрытия, три-8-оксихиналин алюминия, МДМ-структура

D. A. Zayarski, A. A. Neveshkin, V. B. Baiburin, Yu. P. Slapovskaya

MULTILAYER STRUCTURES BASED ON Alq₃: THE CREATION AND STUDY OF THEIR PROPERTIES

The polymer thin film coatings based on tris-(8-hydroxyquinoline)aluminum (Alq_3) creation technique and optimum deposition parameters, wherein the coating thickness is within 100 nm are presented. The multilayer thin film MDM-structures based on Alq_3 were created and their electro-physical properties were investigated.

Keywords: polymer coating, tris-(8-hydroxyquinoline)aluminum, MDM-structure

Введение

Развитие рынка электронной техники неминуемо ведет к развитию электроники. Электронные устройства на основе тонкопленочных сэндвичструктур на сегодняшний день переходят из разряда прототипов в серийно выпускаемую продукцию, например, сотовые телефоны с дисплеями на основе органических светодиодов, электронные книги на основе электрохромной технологии и технологии электронных чернил, тонкопленочные диоды и транзисторы [1, 2] и системы управления на их основе. Однако создание новых материалов и отработка технологических параметров их нанесения являются сложными задачами. решением которых занимается множество научных групп и целых компаний. Структуры, созданные на основе электронно- и дырочно-транспортных материалов, могут стать достаточно перспективной заменой твердотельной электронике или, по крайней мере, значительно расширить ее возможности [2]. Основная цель работы — отработка технологии формирования нанотолщинных покрытий из сопряженных полимеров на твердой подложке для создания сэндвич-структур и исследование их свойств.

Экспериментальная часть

При изготовлении исследуемых образцов сэндвич-структур были выбраны следующие материалы производства фирмы *Sigma-Aldrich Chemie GmbH*: поли (9-винилкарбазол) (PVC), его использовали в качестве электронно-транспортного полимера и допировали люминофорами в различных концен-



Рис. 1. Структурные формулы соединений

трациях; поли(3,4-этилендиоксиофен)-полистиролсульфонат натрия (PEDOT:PSS), который был использован в качестве дырочно-транспортного полимера; три-8-оксихиналин алюминия (Alq₃) 99,99 % — электролюминесцентный материал, его применяли для допирования PVC. Структурные формулы соединений приведены на рис. 1.

Образцы исследуемых структур формировали на базе ФГУП НИИ "Волга" с применением методик полива и центрифугирования полимеров, а также вакуумного напыления металлов и сплавов, для создания контактов. Одной из основных задач исследований являлся подбор технологических параметров формирования нанотолщинных полимерных покрытий методом полива и центрифугирования. Для проведения исследований были подготовлены образцы следующих растворов:

- раствор РVС в хлороформе с концентрацией 10 мг/мл;
- раствор РVС в хлороформе с концентрацией 10 мг/мл, допированный Alq₃ с концентрацией люминофора 10, 20 и 30 % по массе полимера;
- водный раствор PEDOT:PSS с концентрацией 3 мг/мл.

Растворы полимеров наносили методом полива и центрифугирования, причем толщину слоя контролировали с помощью изменения частоты вращения центрифуги. Число оборотов варьировали от 1000 до 3000 оборотов в минуту. Для образцов, полученных при разных частотах вращения, строили зависимости толщины и шероховатости покрытия от частоты вращения, а также его оптической плотности в диапазоне длин волн излучения исследуемых люминофоров. Это делалось для подбора режима нанесения полимеров и композитов, при котором толщины формируемых покрытий составляли 100...120 нм, что является оптимальным для формирования тонкопленочных диодных структур на органических проводящих материалах.

В качестве подложек для формирования сэндвич-структур использовали стекла, покрытые слоем индий-оловянного оксида (ITO), обработанные методом ионно-плазменного травления. Электрические контакты к исследуемым образцам формировали методом термического испарения с применением установки вакуумного напыления УВН-3М. Напыление велось в вакууме при давлении остаточных газов порядка $5 \cdot 10^{-4}$ Па с вольфрамовой лодочки, нагрев осуществлялся резистивным методом. В процессе исследований формировались как однослойные, так и многослойные контакты поверх покрытий полимеров. Для формирования контактов использовали алюминий и сплав алюминия с кальцием в соотношении 97:3. Слой чистого Alq₃ выполнял роль дырочно-блокирующего слоя в ряду двухслойных контактов.

Морфологию подложек, покрытий, контактов и готовых структур оценивали методом атомносиловой микроскопии [3] с помощью зондовой нанолаборатории INTEGRA Spectra (Россия, Зеленоград), в режиме полуконтактной атомно-силовой микроскопии с применением кантилевера NSG-11, с резонансной частотой 120 кГц. Обработку изображений вели по стандартным алгоритмам в программе Gwyddion, версия 2.1 [4].

Спектральные зависимости оптической плотности для разных покрытий регистрировали с помощью спектрофотометра Lambda 950, Perkin Elmer, регистрацию проводили с применением интегрирующей сферы. Спектральные зависимости люминесценции регистрировали с помощью зондовой нанолаборатории INTEGRA Spectra. Измерения проводили с применением дифракционной решетки 150/500 с разрешением 0,3 Å. Для возбуждения использовали лазер с длиной волны 473 нм, имеющий мощность пучка на выходе около 35 мВт. Диаметр фокального пятна лазера составлял около 300 нм.

Толщину покрытия определяли двумя методами: методом эллипсометрии и по размеру ступеньки после удаления части покрытия, с помощью атомно-силовой микроскопии. Эллипсометрические измерения полученных покрытий проводили на воздухе нуль-эллипсометром ЛЭФ-3М-1 (632,8 нм) при двух углах падения (60° и 70°).

Измерения вольт-амперных характеристик выполняли на станции зондовых измерений EP6 DC (Cascade Microtech) с анализатором полупроводниковых приборов Agilent B1500A.

Разработка и оптимизация методики формирования многослойных структур

Для исследования процесса формирования полимерных покрытий методом полива и центрифугирования были изготовлены три серии образцов с применением растворов полимеров, описанных выше. Нанесение покрытий на подложки вели методом полива и центрифугирования при частотах вращения 1000, 2000 и 3000 оборотов в минуту, более низкие или высокие частоты вращения не применяли, так как либо раствор не растекался по объему и не формировал равномерное покрытие, либо большую его часть уносили с поверхности центро-



Рис. 2. Морфология поверхности покрытий: a - PVC; $\delta - PVC$, допированного Alq₃; e - PEDOT: PSS

бежные силы и покрытие также не получалось равномерным. Первая серия представляла собой образцы покрытий из чистого РVС, изображения морфологии этих покрытий показаны на рис. 2, а. Из результатов атомно-силовой микроскопии можно сделать вывод, что покрытия на основе PVC обладают высокой регулярностью и равномерностью, шероховатость покрытий не превосходит 0,22 нм. Толщину покрытия определяли двумя методами: методом эллипсометрии и по размеру ступеньки после удаления части покрытия с помощью атомно-силовой микроскопии. Вторая серия представляла собой образцы покрытий из чистого PVC, допированного Alq₃, с концентрацией 10, 20 и 30 % по массе полимера, изображения морфологии этих покрытий представлены на рис. 2, б.

Из результатов атомно-силовой микроскопии можно сделать вывод, что покрытия на основе поли-(9-винилкарбозола) с добавлением люминофоров кардинально отличаются от покрытий как на основе чистого полимера, так и на основе чистых люминофоров. Они имеют островковую структуру, т. е. представляют собой вкрапления люминофора размером около 200 нм в равномерную пленку полимера, шероховатость этих покрытий 40...50 нм. Третья серия представляла собой образцы покрытий из PEDOT:PSS, изображения морфологии этих

Таблица
Результаты измерения толщин и шероховатостей покрытий
в зависимости от настоты врашения неитрифуги

Частота вращения центрифуги, об/мин	Толщина слоя (эллипсомет- рия), нм	Толщина слоя, (ACM), нм	Средняя шерохова- тость, нм			
PEDOT:PSS						
1000	235	277	21			
2000	180	170	23			
3000	95	110	20			
	PVC					
1500	165	180	0,16			
2000	115	120	0,1			
2500	70	90	0,2			



Рис. 3. Оптическая плотность и спектры люминесценции по-крытий

покрытий представлены на рис. 2, в. Из результатов атомно-силовой микроскопии можно сделать вывод, что покрытия на основе поли-(9-винилкарбазола) имеют сложную морфологию, шероховатость около 22 нм. Результаты измерения толщин покрытий приведены в табл. 1.

Кроме того, так как излучение люминофора, размещенного в матрице PVC, должно пройти через слой PEDOT:PSS, то знание значения оптической плотности для тонких слоев этого полимера является необходимым. Измерения оптической плотности проводили в диапазоне 350...800 нм, так как излучение исследуемых люминофоров находится в этой области спектра. Результаты измерений представлены на рис. 3.

В результате данных исследований удалось подобрать оптимальные режимы для нанесения сопряженных полимеров методом полива и центрифугирования и сформировать многослойную сэндвич-структуру. Водный раствор PEDOT:PSS во всех дальнейших экспериментах наносили при частоте вращения 2000 оборотов в минуту, а после нанесения образцы сушили в вакууме $(3 \cdot 10^{-2} \text{ Па})$ в течение 24 ч. Сформированные при данных технологических режимах структуры представлены на рис. 4 (см. третью сторону обложки).



Рис. 5. ВАХ структуры ITO/PVC:Alq₃/Al (a) и ITO/PEDOT:PSS/PVC:Alq₃/Al (b) в зависимости от концентрации Alq₃:

1 – PVC(90 %):Alq₃(10 %); 2 – PVC(80 %):Alq₃(20 %); 3 – PVC(70 %):Alq₃(30 %)

Таким образом, была отработана и оптимизирована методика формирования тонкопленочных полимерных покрытий методом полива и центрифугирования. Установлен оптимальный режим нанесения, при котором толщины покрытий находятся в пределах 100 нм, а также создана многослойная тонкопленочная МДМ-структура на основе Alq₃.

Исследования электрофизических свойства МДМ-структур. Электрофизические свойства полученных МДМ-структур на основе Alq_3 исследовали методом статических ВАХ. Анализируя измеренные зависимости вольт-амперных характеристик структур ITO/PVC: Alq_3/Al (рис. 5, *a*) и ITO/PEDOT:PSS/PVC: Alq_3/Al (рис. 5, *б*) с различным процентным содержанием Alq_3 в матрице PVC, можно сказать следующее:

- с увеличением процентного содержания Alq₃ в матрице PVC значение прямого тока при равном значении напряжения U_{пр} уменьшается, прямая ветвь приобретает более пологий характер, что наиболее заметно для структур, содержащих слой PEDOT:PSS;
- структуры, содержащие дополнительный эмиссионный полимерный слой PEDOT:PSS, выдерживают большее напряжение;

Таблица	2
Рассчитанные значения эффективных высот потенциального барьера исследуемых структур	

	φ _b , э Β				
Состав пленки	ITO/PVC:Alq ₃ /Al	ITO/PEDOT: PSS/PVC:Alq ₃ /Al			
PVC (90 %):Alq ₃ (10 %) PVC (80 %):Alq ₃ (20 %) PVC (70 %):Alq ₃ (30 %)	0,55 0,421 0,411	0,367 0,411 0,579			

 прямые ветви ВАХ всех опытных образцов подобны диодным, но значения обратного тока на три порядка выше соответствующих значений для диодов.

Для определения типа проводимости был проведен анализ высоты потенциального барьера исследуемых структур. Поскольку исследуемая структура содержит несколько барьеров, а модель расчета предполагает только один, полученные высоты являются эффективными, т. е. характеризуют всю структуру в целом (табл. 2).

Анализируя полученные результаты можно предположить, что механизм переноса заряда через ди-

электрик является суперпозицией эмиссий Шоттки и Пула-Френкеля.

Заключение

В результате была отработана и оптимизирована методика формирования тонкопленочных полимерных покрытий методом полива и центрифугирования. Установлен оптимальный режим нанесения, при котором толщины покрытий находятся в пределах 100 нм, а также создана многослойная тонкопленочная МДМ-структура на основе композита, содержащего Alq₃ в полимерной матрице. Проведены исследования электрофизических свойств полученных МДМ-структур методом статических ВАХ. Установлено, что прямые ветви ВАХ всех опытных образцов подобны диодным, но значения обратного тока на три порядка выше соответствующих значений для диодов. Также обнаружено влияние состава структур и процентного содержания Alq₃ в матрице PVC на вид BAX и определен механизм переноса заряда через композит.

Список литературы

1. Strieker J. T., Gudmundsdottir A. D., Smith A. P. et al. Fabrication of Organic Thin-Film Transistors Using Layer-by-Layer Assembly // J. Phys. Chew. B. 2007. Vol. 111, N_{23} P. 6322–6326.

2. Javey A., Nam S. W., Friedman R. S. et al. Lieber Layerby-Layer Assembly of Nanowires for Three-Dimensional, Multifunctional Electronics // Nano Lea. 2007. Vol. 7, \mathbb{N} 3. P. 773–777.

3. Сердобинцев А. А., Веселов А. Г., Кирясова О. А. и др. Импульсное напыление в низкотемпературной плазме тонких пленок с наноразмерной периодичностью свойств // Физика и техника полупроводников. 2009. Т. 43, № 6. С. 859—862.

4. **Gwyddion** software, GNU General Public License: бесплатное и открытое программное обеспечение. URL: http://gwyddion.net/

Моделирование и конструирование MHCT Modelling and designing of MNST

УДК 621.382

Д. Л. Винокуров, аспирант, стажер-исследователь E-mail: 2vinokurov@mail.ru Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования "Московский государственный технический университет радиотехники,

электроники и автоматики"

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ МАГНИТНОЙ СТРУКТУРЫ КОМПЕНСИРОВАННОЙ ГРАНИЦЫ РАЗДЕЛА ФЕРРОМАГНЕТИК—МУЛЬТИФЕРРОИК

Поступила в редакцию 08.11.2013

Проведено численное моделирование магнитной структуры компенсированной границы раздела ферромагнетик мультиферроик. Найдены искажения магнитных параметров порядка, убывающие по мере удаления от границы раздела. Проведена оценка вкладов в энергию межслойного взаимодействия магнитных параметров порядка, которая показала, что основной вклад обусловлен обменным взаимодействием.

Из условия переключения намагниченности ферромагнитного слоя электрическим полем, приложенным к слою мультиферроика, получено ограничение сверху на толщину ферромагнитного слоя. Результаты, полученные при численном моделировании, хорошо согласуются с развитой ранее линейной теорией и дополняют ее.

Ключевые слова: магниторезистивная память, запись электрическим полем, мультиферроик, многослойные наноструктуры

D. L. Vinokurov

NUMERICAL SIMULATIONS OF A MAGNETIC STRUCTURE AT THE COMPENSATED FERROMAGNET-MULTIFERROIC INTERFACE

A numerical simulation of a magnetic structure at the compensated ferromagnetic-multiferroic interface were carried out. The decrease of distortions of the magnetic order parameters with increasing distance from the interface were discovered. The evaluation of contributions to the energy of interlayer interaction of magnetic order parameters was derived, and it was demonstrated that its magnitude was determined by an exchange interaction. From the condition for magnetization switching of the ferromagnetic layer by an electric field applied to the multiferroic layer an upper limit on the thickness of the ferromagnetic layer was obtained. The results obtained by a digital simulation agree with the previously developed linear theory and complement it.

Keywords: MRAM, electric field recording, multiferroic, multilayer nanostructures

Введение

Повышенный интерес к структуре ферромагнетик—мультиферроик обусловлен перспективой создания устройства памяти нового поколения: магниторезистивной памяти с переключением электрическим полем (MERAM) [1]. Такое устройство сможет заменить большинство существующих устройств памяти, ввиду его явных преимуществ: быстродействие, энергонезависимость, малое потребление электрического тока, неограниченное время хранения информации, радиационная стойкость и возможность дальнейшей миниатюризации. Однако создание прототипов устройств MERAM и устройств, рассчитанных на широкое применение, осложнено рядом нерешенных вопросов в теории многослойных магнитных наноструктур. Они связаны с учетом влияния границ раздела слоев, а также поверхностных свойств отдельных материалов.

В работе [2] было проведено теоретическое исследование магнитной структуры границы раздела в двухслойной структуре ферромагнетик-мультиферроик. Найдена энергия взаимодействия слоев с учетом полученных искажений параметров порядка и условие, когда она оказывается достаточной для разворота вектора намагниченности ферромагнитного слоя электрическим полем. Развитая в работе линейная теория позволила объяснить механизм переключения устройства памяти MERAM. Однако используемое приближение малых углов разворота не позволяет получить полное представление о магнитной структуре компенсированной границы раздела ферромагнетик-мультиферроик в случае сравнимых значений внутрислойного и межслойного обменных интегралов. Поскольку для технического применения наибольшую значимость имеет именно этот случай, то необходимо прибегнуть к численным методам, которые позволят найти решение задачи с требуемой точностью. Этому вопросу и посвящено данное исследование.

Постановка задачи

Рассмотрим дискретную решетку спинов системы ферромагнетик—мультиферроик при температуре $T \ll T_N$ и $T \ll T_C$, когда модули локализованных спинов можно считать неизменными. Будем предполагать, что слои выращены эпитаксиально, т. е. кристаллическая решетка ферромагнитного слоя продолжает кристаллическую решетку мультиферроика. Пронумеруем компенсированные атомные плоскости, параллельные границе раздела, индексами *i* и *j* для мультиферроика и ферромагнетика соответственно, начиная с поверхности. В приближении взаимодействия ближайших соседей обменное поле ферромагнетика действует только на один атомный слой спинов мультиферроика (рис. 1).

В отсутствии внешнего поля в обменном приближении вектор намагниченности ферромагнетика ориентируется перпендикулярно вектору антиферромагнетизма мультиферроика, на компенсированную поверхность которого нанесен ферромагнитный слой.

Пусть в плоскости ферромагнитного слоя существуют две легкие оси: [110] и [110], и вектор намагниченности ферромагнетика параллелен направлению [110]. Вектор антиферромагнетизма мультиферроика лежит в плоскости (111) и параллелен направлению [112]. Обменное взаимодейст-



Рис. 1.Ориентация спинов вблизи границы раздела ферромагнетик—мультиферроик. Граница раздела $BiFeO_3(AF)$ — ферромагнетик (F). Все спины принадлежат плоскостям (111), штриховая плоскость соответствует границе раздела

вие спинов нижнего слоя ферромагнетика со спинами верхнего слоя мультиферроика приводит к развороту спинов ферромагнетика на углы $\pm \varphi_j$ в плоскости (111) от направления [110] и к дополнительному скосу намагниченностей подрешеток мультиферроика. Скос намагниченностей антиферромагнитных подрешеток на угол θ_i , отсчитываемый от направлений [112] и [112] происходит в этой же плоскости. Таким образом, в ферромагнетике наводится антиферромагнитный параметр порядка, а в антиферромагнетике — ферромагнитный параметр.

Пусть обменные интегралы J_f , J_{af} и $J_{f, af}$ описывают обменные взаимодействия соседних спинов ферромагнетика, мультиферроика и спинов разных слоев на границе раздела соответственно. Тип кристаллической решетки и вид среза определяют соотношение числа *a* ближайших к данному спину соседей, расположенных в соседней атомной плоскости, и числа *b* ближайших соседей в своей атомной плоскости для семейства плоскостей, параллельных границе раздела. В случае среза (001) BiFeO₃ a = 1, b = 4.

При заданных *a* и *b* выражение для энергии обменного взаимодействия на границе ферромагнетик—мультиферроик имеет вид [2]:

$$W_{f,af}^{ex} = -aN|J_{f,af}|S_f S_{af} \sin(\theta_1 + \varphi_1), \qquad (1)$$

где S_f и S_{af} — средние значения спинов атомов ферромагнетика и мультиферроика; N — число

атомов атомной плоскости; θ_1 — угол скоса подрешеток в верхней атомной плоскости мультиферроика; φ_1 — угол отворота спинов на нижней атомной плоскости ферромагнетика. От знака $J_{f, af}$ зависит только направление скоса: при $J_{f, af} > 0$ направление вектора намагниченности верхнего слоя мультиферроика совпадает с намагниченностью ферромагнетика, а при $J_{f, af} < 0$ эти векторы являются противоположно направленными.

Энергии обменного взаимодействия в слоях ферромагнетика и мультиферроика равны соответственно

$$W_{f}^{ex} = -\frac{NJ_{f}S_{f}^{2}}{2} \left\{ a\cos(\varphi_{1} - \varphi_{2}) + b\cos(2\varphi_{1} + \sum_{j \ge 2}^{\infty} [a\cos(\varphi_{j} - \varphi_{j-1}) + a\cos(\varphi_{j} - \varphi_{j+1}) + b\cos(2\varphi_{j})] \right\};$$
(2)

$$W_{af}^{ex} = -\frac{N|J_{af}|S_{af}^{2}}{2} \left\{ a\cos(\theta_{1} + \theta_{2}) + b\cos(\theta_{1} + \theta_{2}) +$$

Энергии анизотропии в плоскости (111) для ферромагнетика и мультиферроика имеют вид

$$W_f^{an} = -KN \sum_{j=1}^{\infty} \cos 6\varphi_j; \qquad (4)$$

$$W_{af}^{an} = -AN \sum_{i=1}^{\infty} \cos \theta_i, \qquad (5)$$

где K, A > 0 — константы анизотропии для ферромагнетика и мультиферроика соответственно.

Энергия антисимметричного обмена Дзялошинского—Мория (1) в мультиферроике представляется в виде

$$W_{af}^{DM} = -\frac{NDS_{af}^{2}}{2} \left\{ a\sin(\theta_{1} + \theta_{2}) + b\sin(2\theta_{1} + \frac{1}{2}) + b\sin(2\theta_{1} + \theta_{i-1}) + a\sin(\theta_{i} + \theta_{i+1}) + b\sin(2\theta_{i}) + b\sin(2\theta_{i}) \right\},$$
(6)

где *D* — модуль вектора Дзялошинского.

Введем отклонение угла скоса намагниченностей подрешеток от объемного значения

$$\theta_i = \theta_0 + \chi_i \tag{7}$$

и в дальнейшем будем обозначать индексом ноль объемные значения энергий, без учета поверхностных искажений, т. е. при $\varphi_i = \chi_i = 0$.

Полная энергия взаимодействия слоев

$$W = \Delta W_{f} + \Delta W_{af} + W_{f,af}^{ex} = W_{f}^{ex} - W_{f,0}^{ex} + W_{f,0}^{an} - W_{f,0}^{an} + W_{af}^{ex} - W_{af,0}^{ex} + W_{af}^{an} - W_{af,0}^{an} + W_{af}^{DM} - W_{af,0}^{DM} + W_{f,af}^{ex}.$$
 (8)

Значение межслойного обменного интеграла в системе $BiFeO_3/CoFe$ можно найти из данных о значении коэрцитивного поля [3]. Данные о частотах и ширине линий ферромагнитного резонанса позволяют получить значение обменного интеграла для пленок CoFe [4]. В работе [5] путем анализа экспериментальной петли гистерезиса рассчитано значение константы анизотропии $BiFeO_3$. Значения констант анизотропии CoFe найдены в работах [6, 7]. Из экспериментов по неупругому рассеянию нейтронов [8] получены значения обменного интегралах [6, 7]. Из экспериментов дзялошинского для феррита висмута.

В большинстве экспериментальных работ по системе BiFeO₃/CoFe для интерпретации данных используется наиболее простой гамильтониан Гайзенберга в рамках приближения взаимодействия ближайших соседей. Это приводит к тому, что полученные значения констант могут рассматриваться только как оценки по порядку величины. Для получения более точных значений необходимо прибегать к рассмотрению более сложных моделей.

Известные из литературы экспериментальные значения констант обмена, анизотропии и взаимодействия Дзялошинского—Мориа [3—8] для слоя CoFe на BiFeO₃ удобно представить в виде таблицы.

Экспериментальные	значения	констант
-------------------	----------	----------

Константа	Значение, Дж	Источник
$J_{f,af}$	$8 \cdot 10^{-21}$	[3]
J_f	$11 \cdot 10^{-21}$	[4]
A	$8 \cdot 10^{-26}$	[5]
K	$2,9 \cdot 10^{-26}$	[6]
С	$2 \cdot 10^{-27}$	[7]
D	$1,7 \cdot 10^{-23}$	[8]
J_{af}	$-7 \cdot 10^{-22}$	[8]

Описанная в работе [2] линейная теория соответствует случаю $|J_{f, af}| \ll |J_{af}|$, J_f . Однако в реальных устройствах это условие не всегда выполняется (см. таблицу). Поэтому необходимо численное решение системы уравнений, получающихся путем минимизации полной энергии взаимодействия слоев (8) по χ_i и φ_j . В данном случае нет необходимости в использовании приближения малых углов разворота. Нелинеаризованная система имеет следующий вид:

$$\frac{6A}{|J_{af}|S_{af}^{2}}\sin(6\theta_{0}+6\chi_{1}) + a(1-\delta_{1,i})\sin(2\theta_{0}+\chi_{i}+\chi_{i-1}) + a\sin(2\theta_{0}+\chi_{i}+\chi_{i+1}) + b\sin(2\theta_{0}+2\chi_{i}) - \frac{D}{|J_{af}|}[b\cos(2\theta_{0}+2\chi_{i}) + a(1-\delta_{1,i})\cos(2\theta_{0}+\chi_{i}+\chi_{i-1}) + a\cos(2\theta_{0}+\chi_{i}+\chi_{i+1})] - a\delta_{1,i}\frac{|J_{f,af}|S_{f}}{J_{af}S_{af}}\cos(\theta_{0}+\varphi_{1}+\chi_{1}) = 0,$$

$$i = 1, 2, ...; \qquad (9)$$

$$\frac{6K}{J_f S_f^2} \sin 6\varphi_j + a(1 - \delta_{1,j}) \sin(\varphi_j + \varphi_{j-1}) + a \sin(\varphi_j + \varphi_{j+1}) + b \sin 2\varphi_j - a \delta_{1,j} \frac{|J_{f,af}| S_{af}}{J_f S_f} \cos(\theta_0 + \varphi_1 + \chi_1) = 0,$$

$$i = 1, 2, ...$$
(10)

Найдем объемное значение угла скоса антиферромагнитных подрешеток. Полагая все искажения χ_i равными нулю, но не прибегая к линейному приближению, воспользуемся численным решением уравнения (9) для четной атомной плоскости в пакете символьных вычислений *Maple*. Объемное значение угла скоса составило 0,5°, что несколько меньше значения, полученного из эксперимента [9] по рассеянию нейтронов 0,8°.

Из вида решения для искажений параметров порядка вблизи границы раздела, найденных в рамках линейной теории, следует, что углы разворота магнитных моментов убывают на атомных масштабах. Поэтому в качестве граничного условия, замыкающего систему уравнений, можно положить $\chi_{20} = 0$ и $\varphi_{20} = 0$. Тогда для *i*, *j* = 1...19 из (9), (10) получаем систему из 38 уравнений. Подстановка констант из таблицы, приведенной выше, позволяет численно решить систему в пакете *Maple* относительно соответствующих значений углов разворота.

Результаты расчетов

Для наглядности результаты представлены в виде графика зависимости угла разворота магнитного момента соответствующей атомной плоскости от ее номера, начиная с границы раздела слоев (рис. 2). На графике изображены результаты численного решения и аналитического решения в линейном приближении. Видно, что несмотря на выход на границу применимости линейной теории она позволяет получать оценки по порядку величины для значений углов разворота магнитного момента. Сравнение численного и аналитического решения на границе применимости линейной теории показало, что относительная погрешность линейной теории для φ_i составляет 65 %, а для $\chi_i - 10$ %.

Объемное значение угла скоса антиферромагнитных подрешеток в *G*-фазе BiFeO₃ соответствует среднему значению магнитного момента атома железа $0,02\mu_B$ [9]. Угол скоса подрешеток в первой атомной плоскости $\chi_1 = 49^\circ$, найденный из численного решения, соответствует среднему значению магнитного момента атома железа в этой плоскости $0,9\mu_B$. Это означает, что среднее значение магнитного момента атома железа вблизи границы раздела ферромагнетик—мультиферроик значительно отличается от своего объемного значения. Данное утверждение имеет экспериментальное подтверждение: полученные в системе BiFeO₃/LSMO



Рис. 2. Зависимость угла разворота от номера атомной плоскости. О — значения углов в соответствующей атомной плоскости (результат линейного приближения), ◇ — значения углов в соответствующей атомной плоскости (результат линейного приближения), + — значения углов в соответствующей атомной плоскости (численно), ◆ — значения углов в соответствующей атомной плоскости (численно)

методом рентгеновского магнитного кругового дихроизма средние значения магнитного момента атома железа в объеме BiFeO3 и вблизи границы раздела составили соответственно $0,03\mu_{R}$ и $0,6\mu_{R}$ [10]. Наличие линейного магнитоэлектрического эффекта приводит к появлению дополнительного вклада в среднее значение магнитного момента в объеме образца. Максимальное значение магнитоэлектрического коэффициента для BiFeO3 найдено в феррите висмута [11], допированном кобальтом и самарием, и составляет $0.8 \cdot 10^{-10} \,\mathrm{c} \cdot \mathrm{m}^{-1}$, что в 20 раз превышает значение для классического магнитоэлектрика Cr₂O₃. Однако, даже при таком гигантском линейном магнитоэлектрическом эффекте, среднее значение магнитного момента при приложении электрического поля порядка 107 В/м составляет всего 0,04µ_B. Данный результат демонстрирует, что линейный магнитоэлектрический эффект не может являться механизмом, позволяющим управлять намагниченностью в слое ферромагнетика в устройствах памяти на основе гетероструктуры ферромагнетик-мультиферроик.

Зная найденные из численного решения углы разворота магнитных параметров порядка χ_i и φ_j , можно оценить относительный вклад каждого из слагаемых в выражении (8) в полную энергию взаимодействия слоев.

Поскольку $\chi_{20} = 0$ и $\varphi_{20} = 0$, в выражениях (2)—(6) бесконечный ряд можно заменить конечной суммой, ограничившись 19 атомными плоскостями.

Тогда слагаемые в выражении (8) принимают следующий вид:

$$W_f^{ex} - W_{f,0}^{ex} = 9,05 \cdot 10^{-3} N J_f S_f^2;$$
 (11)

$$W_{af}^{ex} - W_{af,0}^{ex} = 2,69N|J_{af}|S_{af}^2;$$
 (12)

$$W_{f,af}^{ex} = -0,79N|J_{f,af}|S_f S_{af};$$
(13)

$$W_f^{an} - W_{f,0}^{an} = 3,71 \cdot 10^{-2} KN;$$
 (14)

$$W_{af}^{an} - W_{af,0}^{an} = 0,57AN; (15)$$

$$W_{af}^{DM} - W_{af,0}^{DM} = -2,29NDS_{af}^{2}.$$
 (16)

Выражения (11)—(16) в сумме составляют полную энергию взаимодействия слоев W для заданных в таблице значений констант. Выделим слагаемые, связанные с обменным взаимодействием, анизотропией и взаимодействием Дзялошинского-Мория

$$W_{\Sigma}^{ex} = W_{f}^{ex} - W_{f,0}^{ex} + W_{af}^{ex} - W_{af,0}^{ex} + W_{f,af}^{ex};$$
(17)

$$W_{\Sigma}^{an} = W_{f}^{an} - W_{f,0}^{an} + W_{af}^{an} - W_{af,0}^{an}; \quad (18)$$

$$W^{DM} = W_{af}^{DM} - W_{af,0}^{DM}.$$
 (19)

Подставляя известные экспериментальные значения констант из таблицы в выражения (11)—(16), можно вычислить относительные вклады от энергии анизотропии и взаимодействия Дзялошинского— Мория в полную энергию взаимодействия слоев:

$$\frac{W_{\Sigma}^{an}}{W_{\Sigma}^{ex}} = 0,0002; \tag{20}$$

$$\frac{W^{DM}}{W_{\Sigma}^{ex}} = 0,011.$$
(21)

Таким образом, реальные значения констант соответствуют случаю преобладания вклада обменной энергии над остальными вкладами. Это подтверждает сделанный в работе [2] вывод, что для создания MERAM на основе BiFeO₃ несущественно наличие линейного магнитоэлектрического эффекта и слабого ферромагнетизма.

Сравним энергию взаимодействия слоев с потенциальным барьером, создаваемым энергией анизотропии ферромагнетика для разворота его намагниченности в плоскости (001) на угол 90°. Энергия анизотропии имеет вид [2]

$$W_f^{an} = -CNn\cos(4\psi), \qquad (22)$$

где C > 0 — константа анизотропии; n — число плоскостей в слое ферромагнетика; ψ — угол между намагниченностью и легкой осью.

Оси трудного намагничивания ориентированы вдоль направлений типа [100]. Значение потенциального барьера, создаваемого энергией анизотропии, равно

$$\Delta W_f^{an} = 2nCN. \tag{23}$$

Тогда условие переключения намагниченности ферромагнитного слоя в плоскости (001) электри-

ческим полем, приложенным к слою мультиферроика, имеет вид

$$W > \Delta \widetilde{W_f^{an}}.$$
 (24)

При подстановке известных значений констант из таблицы в неравенство (24) получим ограничение сверху на максимальное число атомных плоскостей:

$$n < 800.$$
 (25)

Полученное условие соответствует максимально допустимой толщине слоя CoFe, при которой еще возможно переключение, равной 300 нм, что намного превосходит характерную толщину ферромагнитных слоев в магнитном туннельном соединении [12]. Данное условие соответствует наличию двух взаимно перпендикулярных осей легкого намагничивания в слое ферромагнетика.

В случае наличия только одной легкой оси в слое ферромагнетика одного из состояний устройства памяти можно достигать ориентацией намагниченности этого слоя вдоль тяжелого направления. Чтобы на толщине ферромагнитного слоя не сформировалась обменная спиновая спираль и не произошел разворот вектора намагниченности, толщина слоя должна быть меньше толщины блоховской доменной стенки в данном материале [13]. Тогда вектор намагниченности в слое ферромагнетика будет параллелен тяжелому направлению за счет обменной связи со слоем антиферромагнетика. Для СоFе данное ограничение сверху составляет 250 нм.

Заключение

Рассчитаны искажения магнитных параметров порядка в системе ферромагнетик—мультиферроик, спадающие по мере удаления от границы раздела. Результаты численного моделирования позволяют получить полное представление о магнитной структуре компенсированной границы раздела.

Численными методами найдены относительные вклады энергий одноионной анизотропии и взаимодействия Дзялошинского—Мория в полную энергию взаимодействия слоев для реальных значений констант. Они в сумме составляют значение порядка одного процента от суммарной энергии. Энергия межслойного взаимодействия магнитных параметров порядка определяется обменным взаимодействием, что согласуется с предсказаниями ранее развитой линейной теории.

Максимально допустимая толщина слоя ферромагнетика, при которой еще возможно переключение устройства памяти электрическим полем, составляет сотни нанометров.

Исходя из полученных результатов ясно, что создание прототипов MERAM на основе слоя мультиферроика является вполне осуществимой задачей.

Список литературы

1. **Thomas R., Scott J. S., Bose D. N., Katiyar R. S.** Multiferroic thin-film integration onto semiconductor devices // J. Phys.: Cond. Matt. 2010. V. 22. 423201 (17 p.).

2. Винокуров Д. Л., Морозов А. И. Магнитная структура компенсированной границы раздела ферромагнетик—мультиферроик // ФТТ. 2013. Т. 55, № 11. С. 2135—2139.

3. Qiu D. Y., Ashraf K., Salahuddin S. Nature of magnetic domains in an exchange coupled BiFeO₃/CoFe heterostructure // Appl. Phys. Lett. 2013. V. 102. 112902 (5 p.).

4. **Bilzer C., Devolder T., Kim J.-V.** et al. Study of the dynamic magnetic properties of soft CoFeB films // J. Appl. Phys. 2006. V. 100. 053903 (4 p.).

5. Ashraf K., Salahuddin S. Effect of anti-ferromagnet surface moment density on the hysteresis properties of exchange coupled antiferromagnet-ferromagnet systems: The case of bismuth-ferrite // J. Appl. Phys. 2012. V. 111. 103904 (9 p.).

6. Lane M., Chu Y.-H., Holcomb M. et al. Nanoscale contol of exchange bias with BiFeO₃ thin films // Nano Lett. 2008. V. 8, N_{2} 7. P. 2050–2055.

7. Lebeugle D., Mougin A., Viret M. et al. Exchange coupling with the multiferroic compound $BiFeO_3$ in antiferromagnetic multidomain films and single-domain crystal // Phys. Rev. B. 2010. V. 81. 134411 (8 p.).

8. **Jeong J., Goremychkin E. A., Guidi T.** et al. Spin wave measurements over the full Brillouin zone of multiferroic $BiFeO_3 //$ Phys. Rev. Lett. 2012. V. 108. 077202 (5 p.).

9. **Ramazanoglu M., Laver M., Ratcliff II W.** et al. Local Weak Ferromagnetism in Single-Crystalline Ferroelectric BiFeO₃ // Phys. Rev. Lett. 2011. V. 107. 207206 (5 p.).

10. Yu P., Lee J.-S., Okamoto S. et al. Interface ferromagnetism and orbital reconstruction in BiFeO₃—La_{0,7}Sr_{0,3}MnO₃ heterostructures // Phys. Rev. Lett. 2010. V. 105. 027201 (5 p.).

11. **Puli V. S., Kumar A., Panwar N.** et al. Transition metal modified bulk BiFeO₃ with improved magnetization and linear magneto-electric coupling // J. of Alloys and Comp. 2011. V. 509, \mathbb{N} 32. P. 8223–8227.

12. Chen Y.-T., Chang Z.-G. Susceptibility of $CoFeB/AlO_x/Co$ Magnetic tunnel junctions to low-frequency alternating current // Nanomat. 2013. V. 3, N 4. P. 574–582.

13. **Морозов А. И., Рынков Д. О.** Магнитная структура границы раздела системы ферромагнетик—антиферромагнетик с параллельными осями анизотропии // ФТТ. 2007. Т. 49, № 10. С. 1849—1852.

УДК 548.732

А. С. Маркелов, мл. науч. сотр., e-mail: alm.nnov@gmail.ru, **В. Н. Трушин**, д-р физ.-мат. наук, вед. науч. сотр., e-mail: trushin@phys.unn.ru, **Е. В. Чупрунов**, д-р физ.-мат. наук, проф., Нижегородский государственный университет им. Н. И. Лобачевского

ИССЛЕДОВАНИЕ ВОЗМОЖНОСТИ ФОРМИРОВАНИЯ ПРОСТРАНСТВЕННОЙ СТРУКТУРЫ РЕНТГЕНОВСКИХ ПУЧКОВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ЛЕГИРОВАННЫХ КРИСТАЛЛОВ

Поступила в редакцию 12.11.2013

Исследуется возможность управления пространственной структурой рентгеновских дифракционных пучков при воздействии на легированные кристаллы лазерного излучения с пространственно неоднородной интенсивностью. Экспериментально исследовано изменение дифракционных параметров легированного кристалла KDP, вызванное поглощением в нем лазерного излучения длиной волны 532 нм. Приведены данные по моделированию дифракционного изображения поверхности кристалла, находящегося в условиях теплового воздействия на него лазерного пучка.

Ключевые слова: рентгеновское излучение, рентгеновское изображение, пространственная структура, разрешающая способность, температурное поле, контраст

A. S. Markelov, V. N. Trushin, E. V. Chuprunov

INVESTIGATION OF THE POSSIBILITY OF FORMATION OF A SPATIAL STRUCTURE OF X-RAY BEAMS WITH THE USE OF THE DOPED CRYSTALS

This paper investigates a possibility of controlling the spatial structure of the X-ray diffraction beams under the influence of a laser radiation with a spatially non-uniform intensity on the doped crystals. Experimentally investigated was the variation of the diffraction parameters of the doped crystals of KDP, caused by absorption of the laser radiation of 532 nm wavelength in it. Presented are the data of modeling of the diffraction image of the surface of a crystal in the conditions of a thermal impact of a laser beam on the crystal.

Keywords: X-ray, X-ray image, spatial structure, resolution, temperature field, contrast

Введение

Известно, что при поглощении лазерного излучения в кристаллах возникает неоднородный профиль распределения температуры, в результате которого в кристалле возникают тепловые искажения, в частности, образуется тепловая линза [1, 2], оптическая сила которой определяется термооптическими характеристиками кристалла, его коэффициентом поглощения и мощностью лазерного излучения. Профиль показателя преломления в этом случае может иметь различный вид. К примеру, в случае аксиально-симметричного профиля тепловыделения в стержне радиусом r профиль показателя преломления в стержне радиусом r профиль показателя преломления [3]:

$$n(r) = n_0 - n_2 r^2 / 2, \tag{1}$$

где n_0 — показатель преломления на оси кристалла; n_2 — добавка к коэффициенту преломления кристалла, связанная с его нагревом.

Возникающие при этом градиенты температур вызывают тепловые деформации [4], делающие изотропную среду анизотропной [5, 6]. В некоторых случаях тепловые эффекты могут быть использованы для компенсации фазовых аберраций, что относится к области адаптивной оптики. Для этого, например [7], осуществляется дополнительный нагрев оптических элементов, в том числе лазерным излучением.

При решении некоторых задач адаптивной рентгеновской оптики также можно использовать неоднородное тепловое воздействие света на кристалл [8], позволяющее создавать в нем управляемые обратимые неоднородные деформации, на основе которых возможно формировать пространственную структуру дифрагирующего рентгеновского пучка и корректировать его сходимость [9]. На возможность фокусировки рентгеновского излучения с использованием деформируемых кристаллов и создания на этой основе фокусирующих оптических систем указывалось, например, в работе [10].

В предыдущих исследованиях данная задача решалась с использованием наносимого на поверхность кристалла поглощающего покрытия [8]. В настоящей работе решались следующие задачи:

 исследование влияния теплового воздействия лазерного излучения на дифракционные параметры легированного кристалла дигидрофосфата калия KDP;

- расчет карт температурных полей в объеме легированного кристалла, формируемых прохождением через него лазерного пучка с пространственно неоднородной интенсивностью;
- исследование возможности интерактивного формирования пространственной структуры рентгеновских дифракционных пучков с использованием легированных кристаллов.

Результаты и их обсуждение

На примере легированного (перманганатом калия) кристалла KDP в работе исследована возможность формирования пространственной структуры рентгеновских пучков при прохождении через него неоднородного по интенсивности лазерного пучка с длиной волны 532 нм.

Экспериментальная оптическая схема освещения исследуемого образца показана на рис. 1, а. В качестве источника лазерного излучения 1 использовали лазерный модуль G300DN с длиной волны 532 нм, мощностью 300 мВт. Исследуемый образец 4 размером $2 \times 8 \times 7$ мм, закрепляли на медной пластине 5 толщиной 1 мм, которая крепилась на охлаждаемой поверхности элемента Пельтье 6 с помощью теплопроводного клея. Нагреваемая сторона элемента Пельтье располагалась на поверхности водоблока 7, температура которой поддерживалась постоянной с точностью ±0,5 °С. Температуру охлаждаемой стороны элемента Пельтье регулировали протекающим через него постоянным током от программируемого источника постоянного тока, значение которого задавалось через интерфейс программного модуля. Интенсивность лазерного пучка 3, падающего на образец, изменяли с помощью нейтральных светофильтров 2. Пространственная структура лазерного пучка, формируемая коллиматором 8, имела форму креста. Выбранная система координат, показанная на рис. 1, а, совпадает с кристаллофизической.

Исследуемый образец в интересующей нас области имеет коэффициент пропускания около 30 %, что было достаточно для формирования тепловых полей в кристалле с большим диапазоном изменения температур. Данные по коэффициенту пропускания T_{λ} исследуемого кристалла от длины волны лазерного излучения были получены на спектрофотометре VARIAN Cary 6000i.

На рис. 1, δ показано распределение температуры вдоль оси *Y* исследуемого кристалла при воздействии на него лазерным пучком мощностью 20, 19,4, 18,4 и 15,3 мВт, имеющего форму креста размером 6 × 6 мм и толщиной 1 мм. Температура основания кристалла, измеряемая термопарой хромель-копель, соответствовала 24 °С.

Распределение температуры в кристалле вдоль направления *Y* (см. рис. 1, *a*) определяли по смещению центра тяжести кривых дифракционного отражения (КДО) (020) и рассчитывали в соответствии с формулой

$$T = T_0 + \operatorname{ctg}(\Theta) \Delta \Theta / \alpha_{ii}, \qquad (2)$$

где $\Delta\Theta$ — смещение брэгговского угла, вызванное изменением температуры кристалла; α_{ij} — компонента тензора теплового расширения кристалла в направлении вектора обратной решетки; T_0 — температура кристалла без воздействия на него лазерного пучка.

Максимальная мощность лазерного пучка ограничивалась значением 20 мВт, что связано со значительным изменением полуширины кривой качания, которое затрудняло точно определить изменение дифракционных параметров кристалла.

Рентгенодифракционные измерения проводили на дифрактометре D8 Discover (CuK α_1), диаметр рентгеновского пучка составлял 1 мм. Запись КДО проводили в схеме Брэгга (от поверхности кристалла) и в схеме Лауэ при смещении образца вдоль направления *Y* с шагом 1 мм и интервалом 10 мин, что соответствовало стационарному режиму.

При поглощении лазерного пучка в кристалле создается температурное поле, расчет которого проводили с использованием программного комплекса FlexPDE [11]. Данный комплекс предназначен для построения сценарных моделей решения дифференциальных уравнений методом конечных элементов. Решали стационарное уравнение теплопроводности при наличии внутренних источников теплоты [12].

На рис. 2, *а*, *б* (см. вторую сторону обложки) показаны схема освещения (*a*) и карта температур-



Рис. 1. Изменение температуры в легированном кристалле при воздействии на него лазерным пучком с длиной волны 532 нм:

a — схема освещения; δ — зависимость изменения температуры по глубине кристалла от мощности лазерного пучка; 1 — лазер, 2 — светофильтры, 3 — лазерный пучок, 4 — исследуемый образец, 5 — медная пластина, 6 — элемент Пельтье, 7 — водоблок, 8 — коллиматор

ного поля (δ), рассчитанная для исследуемого кристалла, при воздействии на его поверхность лазерным пучком длиной волны 532 нм и мощностью 19,4 мВт. С использованием данной карты, а также карт, рассчитанных для лазерного пучка мощностью 17,5 и 11,2 мВт, было получено распределение температуры вдоль штриховой линии, показанной на рис. 2, б. Распределение температуры вдоль оси У при использовании выше указанных мощностей лазерного пучка, показано на рис. 2, г (см. вторую сторону обложки). Расчетные профили распределения температуры по глубине кристалла в целом совпадают с экспериментальными данными, показанными на рис. 1, б. Профиль распределения температуры при неизменных параметрах кристалла определяется пространственным распределением интенсивности в лазерном пучке и граничными условиями.

На рис. 2, ∂ (см. вторую сторону обложки) приведена кривая качания (020), рассчитанная для области поверхности кристалла, внутри которой сформировано температурное поле, показанное на рис. 2, δ . Расчет выполняли для образца размером 10 × 10 × 3 мм. Результаты расчета температурного поля использовали в качестве входных данных для моделирования формирования дифракционного изображения неоднородно нагретой поверхности кристалла (топограммы). На рис. 2, *e* (см. вторую сторону обложки) приведена топограмма поверхности кристалла, рассчитанная для рабочей точки, указанной на кривой качания (рис. 2, ∂).

Характер распределения температуры по глубине кристалла зависит не только от интенсивности светового потока, падающего на кристалл, но и от граничных условий и коэффициента поглощения кристалла. При светоиндуцированном формировании тепловых полей в анизотропном кристалле необходимо учитывать влияние двулучепреломления на распространение лазерного пучка через кристалл [13].

Заключение

В работе показано, что при воздействии на кристалл относительно небольшим по мощности (10...20 мВт) лазерным пучком можно вызывать заметные изменения его дифракционных параметров. Для этого необходимо чтобы кристалл имел малую теплопроводность и большой коэффициент теплового расширения. На примере легированного кристалла КDP были рассчитаны карты температурных полей, сформированные при прохождении через него неоднородного по интенсивности лазерного пучка с длиной волны 532 нм. Приведены данные расчетов по пространственной структуре рентгеновских пучков в геометрии Брэгга. Анализ полученных данных показывает, что поглощающие свет кристаллы могут быть использованы в целях корректировки сходимости рентгеновских пучков в геометрии Лауэ. Данное предположение основано на том, что в таких кристаллах можно гибко управлять полем температурных деформаций, а следовательно, изменять дифракционные параметры кристалла на пути распространения через него рентгеновских лучей. Параметры создаваемого температурного поля определяются распределением интенсивности в лазерном пучке, спектральными и тепловыми характеристиками кристалла, а также его анизотропными свойствами.

Для более гибкого формирования тепловых полей деформации в объеме кристалла можно использовать источник света, содержащего несколько длин волн. В этом случае удачным решением может быть использование мультимедийного проектора, в котором пространственное распределение света и его гамма формируются компьютерной программой на основе обратной связи с цифровой рентгеновской камерой, фиксирующего параметры рентгеновского пучка.

Список литературы

1. Мезенов А. В., Сомс Л. Н., Степанов А. И. Термооптика твердотельных лазеров. Л.: Машиностроение, 1986. 199 с.

2. Matsuoka J., Kitamura N., Fujinaga S., Kitaoka T., Yamashita H. Temperature dependence of refractive index of SiO_2 glass // Journal of Non-Crystalline Solids. 1991. V. 135, N 2. P. 86–89.

3. Богданов Ю. В., Папченко А. А., Сорокин В. Н. Расчет основной моды резонатора с протяженной тепловой линзой // Квантовая электроника. 1994. Т. 21, № 11. С. 1041—1048.

4. Ландау Л. Д., Лифшиц Е. М. Теория упругости. М.: Наука, 2004. 259 с.

5. **Хазанов Е. А.** Компенсация термонаведенных поляризационных искажений в вентилях Фарадея // Квантовая Электроника. 1999. Т. 26, № 1. С. 59—64.

6. Шаскольская М. П. Кристаллография. М.: Высшая школа, 1984. 376 с.

7. Lawrence R., Ottaway D., Zucker M., Fritschel P. Active correction of thermal lensing through external radiative thermal actuation // Optics Letters, 2004. V. 29, N 22. P. 2635–2637.

8. Маркелов А. С., Трушин В. Н., Чупрунов Е. В. Особенности формирования контраста рентгеновских изображений при дифракции рентгеновских лучей от поверхности кристаллов, имеющих колончатую структуру // Нано- и микросистемная техника. 2009. № 1. С. 16—18.

9. **Трушин В. Н., Жолудев А. А., Маркелов А. С.** и др. Термоиндуцированная корректировка волнового фронта рентгеновских дифракционных пучков // Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования. 2005. № 8. С. 39–43.

10. Андреев А. В., Коновко А. А. Фокусировка рентгеновского излучения с помощью деформированных кристаллов // Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования. 2003. № 1. С. 28—32.

11. **Программный** комплекс FlexPDE. URL: http://www.pdesolutions.com.

12. Исаченко В. П., Осипова В. А., Сукомел А. С. Теплопередача: учебник для вузов. Изд. 3-е. М.: Энергия, 1975. 488 с.

13. Зайцева Е. В., Маркелов А. С., Трушин В. Н. и др. Особенности формирования рентгеновских изображений в двулучепреломляющих кристаллах // Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования. 2012. № 7. С. 55–58.

Элементы MHCT *M*icro-AND NANOSYSTEM TECHNIQUE ELEMENTS

УДК 621.586.4

И. В. Годовицын, канд. техн. наук, ст. науч. сотр., e-mail: iog@tcen.ru, С. С. Генералов, нач. лаб.,

С. А. Поломошнов, канд. техн. наук, нач. лаб., П. А. Сывороткин, инж. 1 кат.,

В. В. Амеличев, канд. техн. наук, нач. отдела,

НПК "Технологический центр", Зеленоград

ИНТЕГРАЛЬНЫЙ КОНДЕНСАТОРНЫЙ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЬ АКУСТИЧЕСКОГО ДАВЛЕНИЯ ДЛЯ МИНИАТЮРНОГО МЭМС-МИКРОФОНА

Поступила в редакцию 19.11.2013

Статья посвящена разработке конструкции конденсаторного преобразователя акустического сигнала для МЭМСмикрофона. Структура преобразователя включает подвижную, чувствительную к акустическому давлению мембрану и неподвижную сигнальную пластину, сформированные из слоев осажденного поликремния. Особенное внимание уделено снижению механических напряжений в мембране и сигнальной пластине. Полость в кремниевой подложке, выполняющая функцию источника опорного давления, сформирована с использованием жидкостного анизотропного травления. Изготовлены экспериментальные образцы преобразователя и проведена оценка чувствительности, которая составила 4,5...5,0 мВ/Па, что соответствует значению —46 дБ, рассчитанному относительно чувствительности 1 В/Па. Проведена запись звука с помощью стандартной программы звукозаписи, входящей в комплект Windows. Субъективная оценка записи позволяет сказать, что преобразователь обладает высоким качеством передачи звука.

Ключевые слова: МЭМС-микрофон, преобразователь акустического давления, микросистемная технология

I. V. Godovitsyn, S. S. Generalov, S. A. Polomoshnov, P. A. Syvorotkin, V. V. Amelichev

INTEGRATED CONDENSER ACOUSTIC PRESSURE TRANSDUCER FOR A MINIATURE MEMS-MICROPHONE

This article is dedicated to the design of an acoustic pressure transducer for a miniature MEMS microphone. The structure of the transducer includes a movable acoustic pressure sensitive membrane and a fixed back plate, both formed from the deposited polysilicon layers. Special attention was devoted to the reduction of the internal stress in the polysilicon layers and in the back plate. The cavity in the silicon substrate, which performs the function of abutment pressure, was formed with the use of a wet anisotropic etching. Experimental samples of the transducer were manufactured and sensitivity was tested, which was equal to 4,5-5,0 mV/Pa, which was equivalent to -46 dB calculated relatively to the sensitivity of 1 V/Pa. Sound recording was done with a sound recording system standard for Windows application. A subjective estimate of a recording testified that the transducer ensured good quality of the reproduced sound.

Keywords: MEMS microphone, acoustic pressure transducer, microsystem technology

Введение

Быстрый рост производства портативных электронных устройств (мобильных телефонов, коммуникаторов, электронных книг и др.) вызвал значительное увеличение потребности в малогабаритных электронных компонентах, предназначенных для передачи, приема и воспроизведения звуковой информации. В настоящее время конденсаторные кремниевые МЭМС-микрофоны представляют собой наиболее яркий пример использования высокотехнологичного прибора в портативных устройствах бытовой электроники, предназначенных для повседневного использования. В смартфоне IPhone 4 компании Apple установлено три аналоговых МЭМС-микрофона: два в самом смартфоне (для приема речи и подавления внешнего шума), и один — в головной гарнитуре (рис. 1). Два из трех микрофонов выпущено Knowles Acoustics, один —



Рис. 1. МЭМС-микрофоны в IPhone 4 [1]



Рис. 2. Рынок МЭМС-микрофонов в 2011 г. [3]

Infineon Technologies. В 2011 г. для того чтобы укомплектовать выпускаемые смартфоны, Apple пришлось скупить 27 % мирового рынка МЭМС-микрофонов, т. е. стать их основным мировым потребителем [1].

В 2012 г. для обеспечения потребностей производителей электронных устройств компаниямипроизводителями компонентов электроники поставлено 1,05 млрд МЭМС-микрофонов на сумму 582 млн долл. США. По прогнозу аналитиков, к 2016 г. объем рынка МЭМС-микрофонов в денежном выражении достигнет 1 млрд долл. [2]. Лидер производства — Knowles Acoustics, занимавший в 2011 г. 83 % рынка (рис. 2) [3]. Микрофоны Knowles Acoustics используются в большинстве современных смартфонов и планшетных компьютеров.

Доминирование конденсаторных МЭМС-микрофонов в бытовой электронике в первую очередь обусловлено простотой их миниатюризации и надежностью. Миниатюризация в совокупности с технологией группового изготовления позволила снизить стоимость изготовления МЭМС-микрофона до 12...16 центов США [1]. Ближайшими конкурентами конденсаторных МЭМС-микрофонов являются электретные микрофоны, которые, обладая более высокой чувствительностью, труднее поддаются групповым способам изготовления и миниатюризации. Кроме того, из-за ключевой конструктивной особенности, состоящей в наличии поляризованного слоя на одной из обкладок, электретные микрофоны имеют существенный недостаток, заключающийся в старении поляризованного слоя при высокой температуре и влажности, что в итоге приводит к деградации характеристик микрофона.

Современная портативная электронная аппаратура потребительского назначения активно развивается и включает в себя все больше и больше МЭМС-компонентов. Малогабаритные и чувствительные МЭМС-микрофоны несомненно будут все более широко использоваться в электронных устройствах бытового и другого назначения. В связи с этим разработка МЭМС-микрофона с использованием отечественных достижений в области микросистемной технологии представляется весьма актуальной.

Конструктивно-технологические особенности конденсаторных преобразователей акустического давления

Основная причина бурного роста производства МЭМС-микрофонов — развитие и совершенствование технологических процессов микрообработки кремния. С конструктивной точки зрения кремниевый конденсаторный преобразователь акустического сигнала представляет собой относительно простой прибор, имеющий всего два функциональных элемента — сигнальную пластину и чувствительную к акустическому давлению мембрану (рис. 3). Сигнальная пластина выполняет функцию неподвижной обкладки переменного конденсатора и представляет собой жестко закрепленную по периметру пластину с перфорацией. Мембрана сплошная пластина, закрепленная по периферии на нескольких упругих подвесах, служит подвижной обкладкой переменного конденсатора. Сигнальная пластина и мембрана разделены воздушным зазором, толщина которого определяется из требований к характеристикам МЭМС-микрофона. Толщина сигнальной пластины, мембраны и воздушного зазора обычно составляет несколько



Рис. 3. Схема конструкции конденсаторного преобразователя акустического давления

микрометров. При этом для обеспечения высокой чувствительности к звуковому давлению площадь мембраны может достигать 0,7...1,0 мм², а отношение ее толщины к диаметру может находиться в пределах от 1:500 до 1:1000.

Относительная простота конструкции конденсаторного преобразователя акустического давления компенсируется трудностями технологической реализации. Структура преобразователя должна быть изготовлена по интегральной технологии на кремниевой подложке, так как только такой подход обеспечивает создание миниатюрного изделия с низкой себестоимостью. Для этого при изготовлении преобразователя необходимо решить следующие технологические задачи:

- формирование подмембранного объема путем анизотропного травления кремниевой подложки;
- формирование мембраны с низкими механическими напряжениями, чувствительной к акустическому давлению;
- формирование сигнальной пластины с низкими механическими напряжениями;
- формирование воздушного зазора между сигнальной пластиной и мембраной.

Современные технологические процессы позволяют успешно решать данные задачи. Подмембранный объем преобразователя формируется путем анизотропного жидкостного или плазмохимического (так называемого bosch-процесса) травления кремниевой подложки. Воздушный зазор формируется путем удаления промежуточного "жертвенного слоя" с помощью газофазного травления, обеспечивающего преодоление эффекта "прилипания" мембраны и сигнальной пластины друг к другу, которое происходит при использовании жидкостных травителей [4—6].

Наиболее сложную технологическую задачу представляет формирование мембраны и сигнальной пластины с низкими механическими напряжениями. Обычно в качестве материала мембраны используется поликремний, получаемый с помощью высокотемпературного осаждения, для которого характерны высокие сжимающие механические напряжения, достигающие 300...500 МПа [7—9]. Формирование мембраны и сигнальной пластины из такого поликремния неизбежно приведет к ее деформации и, соответственно, к неработоспособности МЭМС-микрофона. На деформацию мембраны и сигнальной пластины также влияет градиент механических напряжений по толщине пленки поликремния.

Снижение механических напряжений в пленке поликремния достигается с помощью высокотемпературного отжига после осаждения [10, 11]. При отжиге происходит увеличение размеров зерен поликремния путем их слияния. Вновь образовавшиеся зерна занимают меньший объем, чем исходный материал, в результате чего происходит "стягивание" слоя поликремния и уменьшение механических напряжений [10, 11]. С помощью отжига механические напряжения могут быть снижены до 1 МПа и менее [9, 10].

Использование высокотемпературного отжига поликремния позволяет решить задачу формирования мембраны и сигнальной пластины с незначительной деформацией. В совокупности с другими технологическими процессами это позволяет реализовать структуру конденсаторного преобразователя акустического давления для МЭМС-микрофона.

Эквивалентная модель конденсаторного преобразователя акустического давления

Для расчета основных параметров конденсаторного преобразователя акустического давления для МЭМС-микрофона наиболее удобно использовать эквивалентную электрическую модель, в которой функциональные элементы микрофона рассматриваются как аналогии элементов электрической цепи. Эквивалентная электрическая модель преобразователя приведена на рис. 4.



Рис. 4. Эквивалентная модель конденсаторного преобразователя акустического давления

В эквивалентной модели через описание их основных характеристик представлены следующие элементы конденсаторного преобразователя акустического давления:

- мембрана (эквивалентная масса M_m и механическая податливость C_m);
- сигнальная пластина (эквивалентная масса M_{sp} и механическая податливость C_{sp});
- перфорация сигнальной пластины (акустическое сопротивление *R*_{pr});
- воздушный зазор (механическое сопротивление *R_{ag}*);
- подмембранный объем (акустическая податливость *C_{bc}*).

Кроме приведенных элементов, на характеристики конденсаторного преобразователя акустического давления могут оказывать влияние эффекты мембранной радиации и релаксации давления в воздушном объеме из-за наличия каналов утечки [12], однако в данной модели эти эффекты не учитываются.

Механический импеданс приведенной эквивалентной модели описывается следующей формулой:

$$Z_m = j_{\omega}M_m + \frac{1}{j_{\omega}C_m} + \frac{1}{j_{\omega}C_{bc}} + \frac{(R_{ag} + R_{pr})(j_{\omega}M_{sp} + \frac{1}{j_{\omega}C_{sp}})}{R_{ag} + R_{pr} + j_{\omega}M_{sp} + \frac{1}{j_{\omega}C_{sp}}}, \qquad (1)$$

где ω — частота звукового воздействия.

Выходное напряжение преобразователя в приближении постоянства заряда на обкладках конденсатора описывается следующим уравнением [12]:

$$V_{\rm o} = Ex = \frac{Ev_m}{j\omega} = \frac{EF}{j\omega Z_m} = \frac{EPA_{eff}}{j\omega Z_m},$$
 (2)

где E — напряженность электрического поля между обкладками конденсатора; x — среднее смещение мембраны; v_m — скорость мембраны; $v_m = j\omega x$; F — сила, действующая на мембрану; $F = PA_{eff}$; P — акустическое давление; A_{eff} — эффективная площадь мембраны.

Чувствительность преобразователя выражается через отношение выходного сигнала к акустическому давлению. В применении к выражению (2) это дает следующее выражение:

$$S = \frac{|V_0|}{P} = \frac{EA_{eff}}{|j\omega Z_m|}.$$
 (3)

Таким образом, выражение (3) позволяет вычислить зависимость чувствительности преобразователя от частоты на основе геометрических параметров конструкции.

Механическая податливость C_m и эквивалентная масса M_m мембраны выражаются следующими соотношениями [13]:

$$C_m = \frac{1}{s_m} \left(\frac{\Delta w}{\Delta P}\right)_m,\tag{4a}$$

$$M_m = \frac{1}{C_m (2\pi f_{rm})^2},$$
 (46)

где s_m — площадь мембраны; $(\Delta w / \Delta P)_m$ — средняя механическая чувствительность мембраны; f_{rm} — резонансная частота мембраны.

Механическая податливость C_{sp} и эквивалентная масса M_{sp} сигнальной пластины выражаются следующими соотношениями [13]:

$$C_{sp} = \frac{1}{(1 - k_A)A_{eff}} \left(\frac{\Delta w}{\Delta P}\right)_{sp}; \qquad (5a)$$

$$M_{sp} = \frac{1}{C_{sp}(2\pi f_{rsp})^2},$$
 (56)

где k_A — часть площади сигнальной пластины, занятая перфорацией; $(\Delta w / \Delta P)_{sp}$ — средняя механическая чувствительность сигнальной пластины; f_{rsp} — резонансная частота сигнальной пластины.

Вязкие потери в воздушном зазоре R_{ag} в приближенном виде выражаются соотношением [13]

$$R_{ag} = \frac{12\nu A_{eff}}{\pi n d^3} \left(\frac{k_A}{2} - \frac{k_A^2}{8} - \frac{\ln k_A}{4} - \frac{3}{8} \right), \tag{6}$$

где v — вязкость воздуха; *n* — число отверстий в сигнальной пластине.

Акустическое сопротивление перфорации сигнальной пластины R_{pr} в приближенном виде выражается соотношением [15]

$$R_{pr} = \frac{8 v t_{sp} A_{eff} k_A}{\pi n r_{pr}^4},\tag{7}$$

где t_{sp} — толщина сигнальной пластины; r_{pr} — радиус отверстия перфорации.

Податливость подмембранного объема C_{bc} в приближенном виде выражается соотношением [12]

$$C_{bc} = \frac{H_{bc}}{\rho_a c_a^2 A_{bc}},\tag{8}$$

где H_{bc} — высота подмембранного объема; A_{bc} — площадь подмембранного объема; ρ_a — плотность воздуха; c_a — скорость звука в воздухе.



Рис. 5. Частотная зависимость чувствительности конденсаторного преобразователя акустического давления (расчет)

После подстановки выражений (4)—(6) в формулу (1) и выражения (1) в формулу (3) может быть вычислена зависимость чувствительности преобразователя от частоты.

Чувствительность преобразователя была рассчитана для трех значений напряжения между мембраной и сигнальной пластиной: 3,0, 6,0 и 9,0 В. Результаты расчета приведены на рис. 5. Как можно видеть на рисунке, преобразователь имеет постоянную чувствительность в звуковом диапазоне частот (100...10 000 Гц). Значения чувствительности близки к чувствительности МЭМС-микрофонов аналогичной конструкции [12, 15—17].

Разработка технологии и изготовление образцов конденсаторного преобразователя акустического давления

На основании результатов расчета конструкции был разработан технологический маршрут изготовления конденсаторного преобразователя акустического давления для МЭМС-микрофона. В маршруте используются технологии объемной и поверхностной микрообработки кремния, позволяющие реализовать структуру с требуемыми геометрическими размерами.

На первом этапе (рис. 6, *a*) с помощью жидкостного анизотропного травления кремния проводится локальное утонение кремниевой подложки в области мембраны. Окно для локального вытравливания кремния определяет местоположение подмембранного объема преобразователя. Толщи-



Рис. 6. Основные этапы технологического маршрута конденсаторного преобразователя акустического давления

НАНО- И МИКРОСИСТЕМНАЯ ТЕХНИКА, № 4, 2014

47



Рис. 7. Общий вид конденсаторного преобразователя акустического давления

на утоненной части кремния (промежуточной технологической мембраны) должна быть такой, чтобы подложка сохранила достаточную жесткость для дальнейшей обработки. На лицевой поверхности подложки формируется изолирующий слой SiO₂, на котором из слоя осажденного поликремния формируется будущая мембрана (рис. 6, δ).

Далее проводится осаждение толстого слоя SiO₂, который служит жертвенным слоем и определяет толщину воздушного зазора между мембраной и сигнальной пластиной (рис. 6, θ). Для данной конструкции толщина жертвенного слоя составила более 2 мкм. В жертвенном слое формируются углубления, которые покрываются изолирующим слоем Si₃N₄.

Проводится осаждение толстого слоя поликремния, предназначенного для формирования сигнальной пластины (рис. 6, г). Поликремний заполняет углубления в жертвенном слое, в результате чего на нижней поверхности сигнальной пластины появляются выступы, предотвращающие замыкание между мембраной и сигнальной пластиной при случайном контакте. С помощью плазмохимического травления в поликремнии формируется перфорация, обеспечивающая доступ акустического сигнала к мембране (рис. 6, ∂). Также вскрывается контакт к первому слою поликремния в целях формирования контактной площадки. На соответствующих этапах технологического маршрута оба слоя поликремния легируются; также проводится высокотемпературный отжиг поликремния для релаксации механических напряжений.

На последнем этапе осуществляется сквозной дотрав кремниевой подложки в области мембраны до слоя SiO_2 , в результате чего формируется подмембранный объем (рис. 6, *e*). Удаление жертвенного слоя сквозь перфорацию в сигнальной пла-

стине проводится в травителе на основе концентрированной плавиковой кислоты. Одновременно удаляется изолирующий слой, в результате чего мембрана освобождается (рис. 6, *e*).

На рис. 7 приведено электронное изображение структуры преобразователя МЭМС-микрофона. Наиболее важным элементом структуры является перфорированная сигнальная пластина, хорошо видная на рис. 7. Пластина служит для демпфирования колебаний мембраны, а также обеспечивает доступ травителя при удалении жертвенного слоя. Кроме того, сигнальная пластина защищает мембрану от загрязнения мелкими частицами мусора. Достижение заданных параметров сигнальной пластины в процессе изготовления является критическим для обеспечения требуемой функциональности преобразователя.

Исследование параметров образцов конденсаторного преобразователя акустического давления

Для исследования образцов преобразователя использовали электрическую схему с единичным коэффициентом усиления (рис. 8), необходимую для усиления тока преобразователя перед дальнейшей обработкой сигнала. Так как изменение емкости преобразователя в рабочем диапазоне акустического давления очень мало и составляет доли фемтофарад, сила выходного тока преобразователя также мала и составляет доли наноампер. С помощью повторителя выходной ток преобразователя усиливается до нескольких миллиампер, что достаточно для дальнейшей обработки. Напряжение на выходе преобразователя, определяемое резистором $R_{\rm CM}$, передается почти без изменения на выход повторителя. Для получения выходного напряжения в несколько милливольт сопротивление резистора $R_{\rm CM}$ должно быть не менее 1 ГОм [18]. После схемы усиления тока сигнал преобразователя обладает достаточной мощностью для того, чтобы быть поданным на вход усилителя или измеритель-







Рис. 9. АЧХ макета МЭМС-микрофона



Рис. 10. Аудиограмма фразы "Технологический центр"

ного прибора, например, анализатора спектра акустического сигнала.

С использованием схемы, приведенной на рис. 8, был изготовлен макет МЭМС-микрофона и проведена оценка его чувствительности, которая составила 4,5...5,0 мВ/Па, что соответствует значению -46 дБ, рассчитанному относительно чувствительности 1 В/Па.

Сигнал макетов МЭМС-микрофона на выходе схемы усиления имеет достаточную мощность для последующей обработки, в частности, для усиления и записи звука с помощью штатных средств звукозаписи, имеющихся в современных компьютерах. Запись звука в файл дает возможность спектрального анализа амплитудно-частотной характеристики (АЧХ) с помощью общедоступных программ. Исследование характеристик микрофонов обычно проводится в специальных заглушенных камерах, обеспечивающих изоляцию от внешних акустических помех и поглощение паразитных волн внутри камеры. Однако качественная оценка АЧХ может быть проведена в обычном помещении с низким уровнем шумов с условием использования достаточно мощного источника звука с ровной выходной характеристикой в требуемом диапазоне частот.

При записи звука в качестве источника использовалась колонка Yamaha MSP5 Studio, имеющая неравномерность АЧХ не более ± 3 дБ в диапазоне частот от 60 Гц до 20 кГц. Звук записывался с помощью стандартной программы звукозаписи, входящей в комплектацию Windows. На колонку подавался сигнал развертки с частотой от 100 Гц до 20 кГц, проводилась запись звука, которая затем сохранялась в wav-файл. Полученный wav-файл анализировали в программе обработки звуковой информации Cubase, которая имеет возможность построения спектральных характеристик по звуковому файлу. На рис. 9 приведена АЧХ макета МЭМС-микрофона, полученная с помощью спектрального анализа звукового файла. Как можно видеть, АЧХ имеет достаточно ровный характер в исследуемом диапазоне частот, что говорит о постоянной чувствительности микрофона. Отдельные пики АЧХ в области низких частот вызваны электромагнитными и

акустическими помехами, источником которых служит окружающая среда.

В дополнение к качественной оценке АЧХ макета МЭМС-микрофона, запись звука дает возможность для оценки качества передачи речи. С помощью стандартной программы звукозаписи были проведены пробные записи разговорной речи. Субъективная оценка записанных фрагментов позволила оценить качество передачи речи как высокое, т. е. обеспечивающее минимальный уровень искажений и точное воспроизведение индивидуальных особенностей тембра голоса. На рис. 10 приведена аудиограмма фразы "Технологический центр", записанной с использованием изготовленного макета МЭМС-микрофона.

Проведенные эксперименты позволяют сделать вывод, что разработанный конденсаторный преобразователь акустического сигнала для МЭМСмикрофона работоспособен и обладает достаточно хорошими характеристиками с качественной точки зрения. Для проведения точных измерений параметров преобразователя необходимо использование специализированного оборудования, включающего заглушенную камеру с калиброванным источником звука, анализаторы звукового сигнала и миниатюрный корпус МЭМС-микрофона. Исследование и разработка конструктивно-технологических методов создания миниатюрного МЭМС-микрофона будут продолжены в предстоящих НИОКР.

Заключение

В настоящее время миниатюрные кремниевые МЭМС-микрофоны представляют собой один из наиболее удачных примеров применения высокотехнологичных изделий в потребительской электронике. Коммерческий успех МЭМС-микрофонов обусловлен прогрессом в технологии микромеханической обработки кремния на протяжении последних 20 лет. Среди поставщиков МЭМС-микрофонов — известные производители микроэлектронных компонентов компании Bosch, Analog Devices, STM, а также лидер рынка МЭМС-микрофонов компания Knowles Acoustics.

Представленные в данной статье результаты демонстрируют потенциальные возможности НПК "Технологический центр" по разработке и серийному производству миниатюрных МЭМС-микрофонов. Опираясь на многолетний опыт в технологии изделий микросистемной техники, коллектив разработчиков создал первую отечественную конструкцию конденсаторного преобразователя акустического сигнала для МЭМС-микрофона, которая является функциональным аналогом зарубежных моделей.

Изготовленные экспериментальные образцы преобразователя для МЭМС-микрофона исследованы с использованием схемы первичного усиления сигнала на специализированном макете измерительного стенда. В результате исследований было установлено, что чувствительность преобразователя составляет 4,5...5,0 мВ/Па. Это соответствует значению –46 дБ, рассчитанному относительно чувствительности 1 В/Па. С помощью стандартной программы звукозаписи, входящей в комплект Windows, проведена запись звука, субъективная оценка которой позволяет сделать вывод о том, что преобразователь обладает высоким качеством передачи звука.

Список литературы

1. Fraux R. Teardowns and Cost analyses: MEMS Microphones Technical and Cost Review, Micromachine // MEMS 2012 Exibition, 11–13 July, Tokyo, Japan. 2. Бурный рост на рынке MEMS-микрофонов продлится еще минимум 3 года // DailyComm: информационно-коммуникационный ресурс ИТ-бизнеса. 2013. URL: http://www. dailycomm.ru/m/21911.html (дата обращения 05.07.2013).

3. **MEMS** for Cell Phones & Tablets, Market & Technology Reports, Yole Development, Lyon, France, 2011.

4. Kim C.-J., Kim J. Y., Sridharan B. Comparative evaluation of drying techniques for surface-micromachining // Sensors and Actuators A. 1988. Vol. 64. P. 17–26.

5. **Mulhern G. T., Sloane D. S., Howe R. T.** Supercritical Carbon Dioxide Drying Of Microstructures // Digest of Technical Papers, The 7th International Conference on Solid-State Sensors and Actuators (Transducers'93), Yokohama, Japan, 7–10 June 1993. P. 296-299.

6. Lee Y.-I., Park K.-H., Lee J., Lee C.-H., Yoo H. J., Kim C. J., Yoon Y. S. Dry Release for surface Micromachining with HF Vapor-Phase Etching // J. of Microelectromechanical Systems. 1997. Vol. 6, N 3. P. 226–233.

7. Howe R. T., and Muller R. S. Stress in polycrystalline and amorphous silicon thin films // Journal of Applied Physics, Aug. 1983. Vol. 54 (8). P. 4674–4675.

8. Benrakkad M. S., Lopez-Villegas J. M., Samitier J., Morante J. R., Kirsten M., and Lange P. Stress gradient and structural properties of atmospheric and reduced pressure deposited polysilicon layers for micromechanical sensors // Sensors and Actuators A (Physical), Oct. 1995. Vol. A51 (1). P. 9–12.

9. Годовицын И. В., Шелепин Н. А., Лыженкова Г. А. Формирование поверхностных микромеханических структур из пленок поликремния // Изв. вузов. Электроника. 1997. № 2. С. 49—54.

10. **Krulevitch P., Howe R., Johnson G.** и др. Stress in undoped LPCVD polycrystalline silicon // Proc. of Int.Conf. on Solid-State Sensors and Actuators, San Francisco, California, June 24–28, 1991. P. 949–952.

11. Kumar M., Parsad M., Goswami N., Arora A., Pant B. D., Dwivedi V. K. Deposition of low stress polysilicon thin films using low-pressure chemical vapour deposition // Indian Journal of Pure & Applied Physics. Apr 2007. Vol. 45. P. 400–402.

12. Wang W. J., Lin R. M., Zou Q. B. and Li X. X. Modeling and characterization of a silicon condenser microphone // J. Micromech. Microeng. 2004. Vol. 14. P. 403–409.

13. **Bergqvist J., Rudolf F.** A silicon condenser microphone using bond and etch-back technology // Sensors Actuators A. 2004. Vol. 45. P. 115–124.

14. **Rossi M.** Acoustics and Electroacoustics. Norwood: Artech House, Incorporated, 1988. 758 p.

15. Hsu P.-C., Mastrangelo C. H., Wise K. D. High sensitivity polysilicon diaphragm condenser microphone // Proc. of The Eleventh Annual International Workshop on Micro Electro Mechanical Systems. Heidelberg, Germany, January 1998. P. 580–585.

16. Mohamad N., Iovenitti P., Vinay T. Modelling and Optimisation of a Spring-Supported Diaphragm Capacitive MEMS Microphone // Engineering. 2010. Vol. 2. P. 762–770.

17. Torkkelia A., Rusanenb O., Saarilahtia J., Seppäc H., Sipolac H., Hietanend J. Capacitive microphone with low-stress polysilicon membrane and high-stress polysilicon backplate // Sensors and Actuators A. 2000. Vol. 85. P. 116–123.

18. **Nielsen J. H., Furst C.** Enabling digital microphones // EE Times-India, August 2008.

Системы-на-кристалле Sistems-on-chip

УДК 51-74

А. В. Вишнеков, д-р техн. наук, проф., зав. каф., **В. В. Ерохин**, канд. техн. наук, доц., Московский институт электроники и математики Национального исследовательского университета "Высшая школа экономики" (МИЭМ НИУ ВШЭ), Москва, avishnekov@hse.ru, vladimir.v.erokhin@gmail.com

ПРОЕКТИРОВАНИЕ СИСТЕМ-НА-КРИСТАЛЛЕ: ВЫБОР БАЗОВОЙ ТЕХНОЛОГИИ ИЗГОТОВЛЕНИЯ КРИСТАЛЛА

Поступила в редакцию 11.11.2013

Рассматривается методика автоматизированного выбора технологии изготовления системы-на-кристалле в условиях изменения окружающей обстановки, основанная на применении методов теории принятия решений. Приводится пример выбора технологии изготовления СНК на основе предложенной методики.

Ключевые слова: проектное решение, лицо принимающее решение (ЛПР), система-на-кристалле (СНК), технология, критерии оценки качества проектного решения, IP-блок

A. V. Vishnekov, V. V. Erokhin

SYSTEMS-ON-CHIP DESIGN: CHOICE OF A CHIP PRODUCTION TECHNOLOGY

The article contains discussion of an automated selection of System-On-a-Chip production in the conditions of variable external environment, the method based on the decision making theory is proposed. An example of SoC production technology choice based on the proposed method is reviewed.

Keywords: project design, decision-making person (DMP), system-on-chip (SoC), technology, quality criteria of design solutions, IP-block

В процессе разработки современной микроэлектронной (наноэлектронной) аппаратуры руководству проекта приходится решать много задач, которые относятся не только собственно к содержательной части проекта, но и к экономической составляющей. Особенно актуально это для изделий, изготавливаемых по современным наномикронным технологиям, когда стоимость даже тестового образца может быть очень высокой не только для среднего бизнеса, но и для крупных фирм. Так что уже на начальных стадиях проектирования необходимо решать ряд вопросов для снижения затрат. Так, сам кристалл может быть выполнен по технологии базового кристалла, полузаказным дизайном или полностью заказным [1]. Чисто экономическая разница при исполнении кристалла по первой и последней технологии может достигать десятков раз при сопоставимых эксплуатационных параметрах, хотя в принципе заказной дизайн обеспечивает более высокие качественные характеристики за счет более плотного размещения элементов и лучших условий для трассировки соединений. В предельном случае для достижения каких-либо особых характеристик фирма может даже пойти на разработку собственной библиотеки элементов, на основе которых будет осуществляться проектирование, отладка их сильно удорожает производство и увеличивает его сроки.

В то же время в ряде случаев разница в параметрах может быть достаточно критичной, чтобы пренебречь чисто экономическими аспектами. Это зависит от возможностей фирмы, ожидаемой отдачи и других факторов. Опять-таки, разные изготовители имеют разные возможности — разный набор IP-блоков от разных поставщиков различной степени надежности и функциональности. Кроме того, есть разница в освоенных технологиях, например, возможности использования в кристалле аналоговых блоков, различной памяти (флэш, EEPROM) и т. д.

Поскольку проектирование может длиться несколько лет, все указанные факторы могут измениться.

Таким образом, актуальна задача минимизировать затраты (финансовые, временные, ресурсные) для разработки и изготовления СНК, отвечающей необходимым требованиям с учетом изменений внешних условий.

Будем считать вариантами изготовления устройства технологии (базовый кристалл, полузаказная ASIC (*Application Specific Integrated Circuit*), полностью заказная ASIC), возможности предполагаемых заводов-изготовителей кристалла (набор IP-блоков, освоенные технологические нормы и процессы) и др. Условно примем три варианта изготовления, которые просматриваются на стадии проектирования, назовем их (опять же условно) ASIC1, ASIC2, ASIC3. Конечно, в реальности таких вариантов может быть больше.

В качестве переменных условий среды примем:

1) изменение финансового состояния фирмы;

2) возможные изменения кадрового состава проектировщиков;

 изменение предпочтений возможных потребителей кристалла;

4) другие факторы.

Выбор наиболее рациональной стратегии разработки и изготовления СНК может быть проведен с применением методов теории принятия решений. Указанные выше внешние условия можно трактовать как возможные состояния внешней среды в методах поддержки принятия решений в условиях неопределенности исходной информации, если все условия внешней среды приняты равновероятными. Если возможен расчет вероятности наступления каждого состояния внешней среды, то целесообразно применение методов поддержки принятия решений в вероятностно-определенных условиях [2].

Рассмотрим в качестве метода принятия решения в условиях неопределенности исходной информации метод расчета платежной матрицы.

Данный метод состоит из двух основных шагов [2]:

- предварительный выбор локально-оптимальных вариантов проектных решений СНК:
- расчет платежной матрицы для выявления наиболее рационального проектного решения СНК (табл. 1).

Характерными оценками альтернативных вариантов проектных решений СНК являются [2] следующие:

 максимальное для рассматриваемого варианта значение функции полезности для варианта проектного решения x_i

$$Z_i^{\max} = \max Z_{ij}, \quad j = 1, S;$$

 минимальное значение функции полезности для варианта x_i

$$Z_i^{\min} = \min Z_{ij}, \quad j = 1, S;$$

Таблица 1

Варианты проектных	Платежная матрица Z — полезность варианта x при состоянии внешней среды y					Характерные оценки			
решений СНК	y_1		y_t		Y _S	Z_i^{\max}	Z_i^{\min}	\overline{Z}_i	R_i^{\max}
<i>x</i> ₁	<i>Z</i> ₁₁		Z_{1t}		Z_{1S}	Z_1^{\max}	Z_1^{\min}	$\overline{Z_1}$	R_1^{\max}
<i>x</i> ₂	Z ₂₁		Z_{2t}		Z_{2S}	Z_2^{\max}	Z_2^{\min}	\overline{Z}_2	R_2^{\max}
x _i	Z_{i1}		Z_{it}		Z_{iS}	Z_i^{\max}	Z_i^{\min}	\overline{Z}_i	R_i^{\max}
x_I	Z_{I1}		Z_{It}		Z_{IS}	Z_I^{\max}	Z_I^{\min}	\overline{Z}_I	R_I^{\max}
Минимальные затраты $Z_j^{*\min}$ для $y_j, j=1, S$	$Z_1^{*\min}$		$Z_t^{*\min}$		$Z_S^{*\min}$				

Платежная матрица и ее характерные значения

 среднее арифметическое значение функции полезности для варианта x_i

$$\bar{Z}_i = \frac{1}{S} \sum_{i=1}^{S} Z_{ij}, \quad j = 1, S_i$$

• максимальное значение риска для варианта x_i

$$R_i^{\max} = \max(Z_{ij} - Z_j^{*\min}), \quad j = 1, S.$$

Критериями выбора рационального проектного решения СНК являются [2] пять приведенных ниже критериев.

1. Критерий Вальда Q_v . По данному критерию отбирается вариант проектного решения x_i , для которого достигается

$$Q_v = \min Z_i^{\max}$$
 (табл. 1).

По этому критерию выбирают проектное решение СНК, для которого полезность принимает наилучшее значение при неблагоприятном сочетании информации (состоянии внешней среды).

2. Критерий Лапласа Q_l . По данному критерию рациональным вариантом x_i является вариант, для которого достигается

$$Q_l = \min \frac{1}{S} \sum_{j=1}^{S} Z_{ij}, \quad i = 1, I.$$

То есть все условия внешней среды считаются равновероятными и отбирается вариант с минимумом среднего арифметического значения функции полезности.

3. *Критерий Сэвиджа* Q_s . Данный критерий основан на оценке риска R_i^{\max} . Здесь выбирается вариант x_i , для которого максимальное значение риска минимально.

$$Q_s = \min \max R_{ii}, \quad j = 1, S.$$

4. Критерий Гурвица Q_g. Здесь отбирается вариант x_i, минимизирующий значение функции полезности с учетом коэффициента *a*:

$$Q_g = \min[aZ_i^{\max} + (1-a)Z_i^{\min}], \quad 0 \le a \le 1,$$

значение коэффициента а задается ЛПР.

ΓД

5. Обобщенный критерий Q. Здесь отбирается вариант x_i , для которого сумма характеристических оценок минимальна с учетом значений коэффициентов a_1 , a_2 , a_3 , a_4 :

$$Q = \min[a_1 Z_i^{\max} + a_2 Z_i^{\min} + a_3 \overline{Z}_i + a_4 R_i^{\max}],$$

we $a_1 + a_2 + a_3 + a_4 = 1, \ 0 \le a_1, \ a_2, \ a_3, \ a_4 \le 1.$

Коэффициент *а* задается лицом, принимающим решение. Этот критерий дает возможность выбрать вариант проектного решения СНК, которое не будет рациональным ни по одному критерию, но достаточно хорошим по всей совокупности критериев.

Основной задачей в методе анализа и расчета платежной матрицы (табл. 1) является определение полезности альтернатив для оценки приемлемости вариантов проектных решений СНК при различных условиях внешней среды. Необходимым условием является минимизация (максимизация) функционала, отражающего полезность альтернатив. Наиболее простой способ решения данной задачи — это задание значения функции полезности как "затрат", если требуется оценить затраты на разработку и производство СНК. Рассмотрим следующий пример заполнения платежной матрицы (табл. 2).

1. Ценность проектного решения СНК (затраты на производство) задана в явном виде в рублях. Соответственно, чем меньше затраты, тем лучше.

Вычисляются значения Z_i^{\max} , Z_i^{\min} , \overline{Z}_i ; R_i^{\max} вычисляется по формуле $R_i^{\max} = \max(Z_{iS} - Z_S^{\min})$. Для ASIC1:

$$R_1^{\max} = 100 - 100 = 0;$$
 $R_2^{\max} = 200 - 200 = 0;$
 $R_3^{\max} = 300 - 300 = 0;$ $R_4^{\max} = 400 - 400 = 0;$
 $R^{\max} = 0.$

Для ASIC2:

$$R_1^{\max} = 150 - 100 = 50; \quad R_2^{\max} = 250 - 200 = 50;$$

 $R_3^{\max} = 350 - 300 = 50; \quad R_4^{\max} = 450 - 400 = 50;$
 $R^{\max} = 50.$

Пример заполнения платежной матрицы

Таблица 2

Варианты	Условия внешней среды				Характерные оценки			
решений	<i>y</i> ₁	<i>y</i> ₂	<i>y</i> ₃	<i>y</i> ₄	Z_i^{\max}	Z_i^{\min}	\overline{Z}_i	R_i^{\max}
ASIC1	100	200	300	400	400	100	250	0
ASIC2	150	250	350	450	450	150	300	50
ASIC3	300	400	500	600	600	300	450	200
Z_S^{\min}	100	200	300	400				

Для ASIC3:

$$R_1^{\max} = 300 - 100 = 200;$$

$$R_2^{\max} = 400 - 200 = 200;$$

$$R_3^{\max} = 500 - 300 = 200;$$

$$R_4^{\max} = 600 - 400 = 200; \quad R^{\max} = 200$$

2. Вычисляем значения критериев:

а) критерий Вальда $Q_v = 400$ для базового кристалла;

б) критерий Лапласа $Q_l = 250$ для базового кристалла;

в) критерий Сэвиджа $Q_s = 0$ для базового кристалла;

г) критерий Гурвица; примем a = 0.5, тогда $Q_g = 250$ для ASIC1 (для справки приведем здесь и значения критерия для варианта ASIC2 (300) и ASIC3 (450));

д) обобщенный критерий Q; принимаем здесь значения a_1 , a_2 , a_3 , $a_4 = 0.25$, тогда для ASIC1 значение критерия Q равно 187,5, для ASIC2 — 237,5 и для ASIC3 — 387,5. Минимальное значение критерий имеет для базового кристалла.

Лицо, принимающее решение, на основе рассмотрения значения вышеуказанных критериев выбирает наиболее рациональный с его точки зрения вариант проектного решения СНК. В данном случае значения всех критериев указывают на приоритетный выбор базового кристалла. Если бы значения критериев указывали на разные проектные решения, то выбор был бы сделан с учетом субъективных предпочтений лица, принимающего решение.

Однако функция полезности может носить более сложный интегральный характер. Например, оценка способа изготовления СНК может проводиться с учетом таких критериев: затраты на разработку; затраты на производство; время проектирования; время выполнения заказа на заводе-изготовителе.

Для выбора рационального проектного решения СНК в случае нескольких критериев оценки качества (полезности) проектного решения рассчитывается платежная матрица для каждого критерия. Далее лицо, принимающее решение, выполняет расчет весов критериев оценки качества проектных решений, который можно сделать с помощью матрицы парных сравнений, как в методе аналитических иерархий, либо на основе метода предпочтений или метода ранга [3, 4].

Таким образом, итоговый выбор проектного решения СНК проводится на основе расчета итоговой ценности каждого проектного решения методом аналитических иерархий [2]:

$$W_i = V_{K1}W_{1i} + V_{K2}W_{2i} + V_{K3}W_{3i} + V_{K4}W_{4i},$$

где V_{к1} — вес критерия "затраты на разработку";

 W_{1i} — ценность *i*-го варианта проектного решения СНК по критерию "затраты на разработку";

 $V_{\rm K2}$ — вес критерия "затраты на производство"; W_{2i} — ценность *i*-го варианта проектного реше-

ния СНК по критерию "затраты на производство";

*V*_{к3} — вес критерия "время проектирования";

 W_{3i} — ценность *i*-го варианта проектного решения СНК по критерию "время проектирования";

V_{к4} — вес критерия "время выполнения заказа заводом-изготовителем";

*W*_{4*i*} — ценность *i*-го варианта проектного решения СНК по критерию "время выполнения заказа заводом-изготовителем".

Расчет ценности вариантов проектных решений СНК выполняют на основе матрицы парных сравнений по каждому критерию. Степень превосходства одного проектного решения над другим при заполнении матрицы парных сравнений определяется на основе их ранжирования по соответствующей платежной матрице с учетом значений критериев Вальда, Сэвиджа, Гурвица и значения обобщенного критерия. Подробно применение метода аналитических иерархий для выбора проектных решений рассмотрено в работе [5].

Итоговый выбор проектного решения СНК можно также сделать на основе экспертной оценки. Исходная матрица ценностей альтернатив задается с учетом мнений экспертов аналогично методу предпочтений [4], либо как в методе ранга [2]. Экспертные суждения базируются на оценке значений критериев Вальда, Сэвиджа, Гурвица и обобщенного критерия, полученных на основе расчета платежной матрицы.

Рассмотрим подробнее метод предпочтений. Исходная матрица заполняется экспертами. Каждый эксперт задает число, отражающее степень предпочтительности альтернативного проектного решения СНК. Чем число меньше, тем ценность альтернативы выше. Таким образом, эксперт задает числа (места) от 1 до N, где N — число альтернатив. Далее рассчитывается сумма мест для каждой альтернативы S_i , $i = \overline{1, N}$, и суммарное число

всех мест $S = \sum_{i, j=1}^{N, M} S_{ij}$, где N — число экспертов;

М — число альтернативных проектных решений СНК. Итоговая ценность каждой альтернативы рас-

считывается как отношение $S_i^* = \frac{S_i}{S}$, $i = \overline{1, N}$.

Чем меньше значение S_i , тем соответствующее проектное решение СНК является более предпочтительным.

Предположим, по критерию "стоимость проектирования" матрица экспертных оценок выглядит следующим образом (табл. 3).

$$S_{1} = \sum_{j=1}^{3} S_{1j} = 1 + 2 + 3 = 6;$$

$$S_{2} = \sum_{j=1}^{3} S_{2j} = 2 + 3 + 2 = 7;$$

$$S_{3} = \sum_{j=1}^{3} S_{3j} = 3 + 1 + 1 = 5;$$

$$S = S_{1} + S_{2} + S_{3} = 18;$$

$$1 = S_{1}/S = 0.33; \quad W_{12} = S_{2}/S = 0.39;$$

$$W_{13} = S_3/S = 0.28.$$

 W_1

Аналогичным образом делаем расчеты для критерия "стоимость производства", "время проектирования" и "время производства". Здесь приведем конечные результаты (табл. 4—6 соответственно).

Для критерия "стоимость производства":

$$S_{1} = \sum_{j=1}^{3} S_{1j} = 3 + 2 + 3 = 8;$$

$$S_{2} = \sum_{j=1}^{3} S_{2j} = 2 + 1 + 2 = 5;$$

$$S_{3} = \sum_{j=1}^{3} S_{3j} = 1 + 3 + 1 = 5;$$

$$S = S_{1} + S_{2} + S_{3} = 18;$$

$$W_{21} = S_{1}/S = 0.44; \quad W_{22} = S_{2}/S = 0.28;$$

$$W_{23} = S_3 / S = 0,28.$$

Для критерия "время проектирования":

$$S_{1} = \sum_{j=1}^{3} S_{1j} = 1 + 3 + 3 = 7;$$

$$S_{2} = \sum_{j=1}^{3} S_{2j} = 2 + 2 + 1 = 5;$$

$$S_{3} = \sum_{j=1}^{3} S_{3j} = 3 + 1 + 2 = 6;$$

$$S = S_1 + S_2 + S_3 = 18;$$

 $W_{31} = S_1/S = 0,39;$ $W_{32} = S_2/S = 0,28;$
 $W_{33} = S_3/S = 0,33.$

Для критерия "время производства":

$$S_{1} = \sum_{j=1}^{3} S_{1j} = 3 + 1 + 3 = 7;$$

$$S_{2} = \sum_{j=1}^{3} S_{2j} = 2 + 2 + 2 = 6;$$

$$S_{3} = \sum_{j=1}^{3} S_{3j} = 1 + 3 + 1 = 5;$$

$$S = S_{1} + S_{2} + S_{3} = 18;$$

$$W_{41} = S_1/S = 0,39;$$
 $W_{42} = S_2/S = 0,33;$
 $W_{43} = S_3/S = 0,28.$

Таблица 3

Матрица экспертных оценок по критерию "стоимость проектирования"

Эксперты	ASIC1	ASIC2	ASIC3
Эксперт 1	1	2	3
Эксперт 2	2	3	1
Эксперт 3	3	2	1

Таблица 4

Матрица экспертных оценок по критерию "стоимость производства"

Эксперты	ASIC1	ASIC2	ASIC3
Эксперт 1	3	2	1
Эксперт 2	2	1	3
Эксперт 3	3	2	1

Таблица 5 Матрица экспертных оценок по критерию "время проектирования"

Эксперты	ASIC1	ASIC2	ASIC3
Эксперт 1	1	2	3
Эксперт 2	3	2	1
Эксперт 3	3	1	2

Таблица 6

Матрица экспертных оценок по критерию "время производства"

Эксперты	ASIC1	ASIC2	ASIC3
Эксперт 1	3	2	1
Эксперт 2	1	2	3
Эксперт 3	3	2	1

– НАНО- И МИКРОСИСТЕМНАЯ ТЕХНИКА, № 4, 2014 –

Таблица 7

Матрица экспертных оценок важности критериев

Эксперты	Стоимость	Стоимость	Время	Время
	проектиро-	произ-	проекти-	произ-
	вания	водства	рования	водства
Эксперт 1	3	4	1	2
Эксперт 2	1	2	3	4
Эксперт 3	3	2	4	2

Аналогичным образом рассчитаем важность критериев "стоимость проектирования", "стоимость производства", "время проектирования" и "время производства" (табл. 7).

Список литературы

1. **Немудров В., Мартин Г.** Системы-на-кристалле. Проектирование и развитие. М.: Техносфера, 2004. 216 с.

2. Беляев Л. С. Решение сложных оптимизационных задач в условиях неопределенности. Новосибирск: Наука, 1978. 126 с.

3. **Ларичев О. И.** Теория и методы принятия решений. 2-е изд., перераб. и доп. М.: Логос, 2002. 392 с.

4. Васильев Ф. Н., Вишнеков А. В., Феропонтова Е. С. Методы поддержки принятия групповых решений // Качество и ИПИ-технологии. 2007. № 2. С. 51—55.

5. Вишнеков А. В., Ерохин В. В. Проектирование системна-кристалле: риски и решения // Нано- и микросистемная техника. 2013. № 10. С. 49—54.

For foreign subscribers:

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

The journalis published since November 1999. Editor-in-Chief Professor Petr P. Maltsev, Deputy Editor-in-Chief Professor Victor V. Luchinin (Russia), Deputy Editor-in-Chief Professor Michael S. Shur (USA)

ISSN 1813-8586.

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

Please see previous journal's issues at our website (http://novtex.ru/nmst) For any further information, please contact us by e-mail: nmst@novtex.ru

Адрес редакции журнала: 107076, Москва, Стромынский пер., 4. Телефон редакции журнала (499) 269-5510. E-mail: nmst@novtex.ru Журнал зарегистрирован в Федеральной службе по надзору за соблюдением законодательства в сфере массовых коммуникаций и охране культурного наследия.

Свидетельство о регистрации ПИ № 77-18289 от 06.09.04.

Дизайнер Т. Н. Погорелова. Технический редактор Е. М. Патрушева. Корректор Е. В. Комиссарова

Сдано в набор 19.02.2014. Подписано в печать 24.03.2014. Формат 60×88 1/8. Заказ МС414.

Цена договорная Оригинал-макет ООО «Адвансед солюшнз».

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

– НАНО- И МИКРОСИСТЕМНАЯ ТЕХНИКА, № 4, 2014 –