

НАНО- и МИКРОСИСТЕМНАЯ ТЕХНИКА

№ 2 (103) ✧ 2009

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 Российский индекс научного цитирования

Главный редактор
Мальцев П. П.

Зам. гл. редактора
Лучинин В. В.

Редакционный совет:

Аристов В. В.
Асеев А. Л.
Гапонов С. В.
Каляев И. А.
Квардаков В. В.
Климов Д. М.
Ковальчук М. В.
Нарайкин О. С.
Никитов С. А.
Сауров А. Н.
Сигов А. С.
Чаплыгин Ю. А.
Шевченко В. Я.

Редакционная коллегия:

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

Отв. секретарь
Лысенко А. В.

Редакция:

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

Учредитель:
Издательство
"Новые технологии"

Издается с 1999 г.

СОДЕРЖАНИЕ

ОБЩИЕ ВОПРОСЫ

Негуляев Г. А., Ненахов Г. С. Нанотехнологии: публиковать, сохранять в тайне или патентовать? 2

НАНОТЕХНОЛОГИИ И ЗОНДОВАЯ МИКРОСКОПИЯ

Бобринецкий И. И., Неволин В. К., Горшков К. В., Данькин Д. А. Использование метода диэлектродфореза при формировании интегральных структур на основе углеродных нанотрубок 10

МАТЕРИАЛОВЕДЧЕСКИЕ И ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ МНСТ

Чашухин В. Г. Сухой адгезионный материал для схватов в микроробототехнике . . . 13

Штенников В. Н. Проблемы минимизации времени контактной и лазерной пайки 18

Агасиев А. А., Магеррамов Э. М., Джаббаров Дж. Г., Мамедов М. З. Тепловое расширение твердого тела 21

ЭЛЕМЕНТЫ МНСТ

Дюжев Н. А., Поправкин А. Н., Шкурпат И. Г., Шокин А. Н., Попков А. Ф. Универсальный термочувствительный элемент для датчиков газового потока . . . 23

Туркин И. А. Эффекты отражения от краев экранирующих шин в однонаправленных ВШП фильтров на ПАВ 26

Амеличев В. В., Буданов В. М., Гусев Д. В., Соколов М. Э., Суханов В. С., Тихонов Р. Д. Разработка и создание опытных образцов искусственных тактильных механорецепторов для эндоскопии. 30

Белозубов Е. М., Белозубова Н. Е., Васильев В. А. Тонкопленочные микро-электромеханические системы и датчики на их основе 33

Образцов Р. М. Разработка и анализ упругих подвесов для чувствительного элемента малогабаритного пьезоэлектрического биморфного вибрационного гироскопа 39

ПРИМЕНЕНИЕ МНСТ

Усанов Д. А., Скрипаль А. В., Авдеев К. С. Применение полупроводникового лазерного автодина с модуляцией длины волны излучения для определения расстояния до объекта. 43

МОЛЕКУЛЯРНАЯ ЭЛЕКТРОНИКА И БИОЭЛЕКТРОНИКА

Колобов Ю. Р., Дручинина О. А., Иванов М. Б., Сирота В. В., Лазебная М. А., Храмов Г. В., Трусова Я. В., Сергеева Н. С., Свиридова И. К. Формирование пористых комбинированных биоактивных покрытий на титановых сплавах VT6 и VT16 методом микродугового оксидирования 48

ПРЕДСТАВЛЯЕМ НОВЫЕ КНИГИ 53

Contents 55

Информация о журнале доступна на сайте журнала:
<http://www.microsystems.ru> <http://eLIBRARY.ru>

ПОДПИСКА:

- по каталогу Роспечати (индекс 79493);
- по каталогу "Пресса России" (индекс 27849)
- в редакции журнала (тел./факс: (499) 269-55-10)

Адрес для переписки:
e-mail: nmst@novtex.ru

УДК 621.38

Г. А. Негуляев, канд. техн. наук., вед. науч. сотр.,
Г. С. Ненахов, зав. отделом,
ФГУ "Федеральный институт промышленной
собственности", г. Москва
E-mail: G.Nenakhov@rupto.ru

НАНОТЕХНОЛОГИИ: ПУБЛИКОВАТЬ, СОХРАНЯТЬ В ТАЙНЕ ИЛИ ПАТЕНТОВАТЬ?

Проанализированы общие тенденции патентования в сфере нанотехнологий. С учетом междисциплинарности данной области охарактеризованы основные средства патентного поиска. Приводятся рекомендации по принятию решений о целесообразности патентования и лицензирования изобретений в сфере нанотехнологий в зависимости от патентной и конкурентной ситуации на рынке. Проанализировано соотношение между различными способами обеспечения охраны интеллектуальных прав для изобретений в сфере нанотехнологий, в частности, путем публикации в открытой научно-технической литературе (авторское право), патентования или сохранения в тайне.

Ключевые слова: нанотехнологии, тенденции патентования, патентный поиск, лицензирование, охрана интеллектуальных прав, авторское право, сохранение в тайне.

По сравнению с другими прорывными направлениями техники, которые появились ранее, например, компьютерной техникой, Интернетом, биотехнологией, патентование основных идей и изобретений в сфере нанотехнологий началось практически с самого начала ее развития. Первые патенты были выданы по следующей тематике: углеродные нанотрубки; полупроводниковые нанокристаллы; светолучающие нанокристаллы; наностержни из оксидов металлов; атомно-силовые микроскопы; способ изготовления самообразующегося нанослоя; различные способы изготовления нанотрубок и т. д. [1]. Лишь небольшое число базовых идей осталось не запатентованными, например структура фуллерена, и то потому, что его структура была открыта, как продукт, который встречается в природных условиях. Однако, что касается получения и использования фуллеренов, то по состоянию на 2004 г. было уже выдано более 100 патентов. Одной из причин легкости, с которой началось патентование в этой сфере, является тот факт, что заявки на изобретения, относящиеся к нанотехнологиям, стали подаваться задолго до того, как появились первые теоретические

обоснования этой дисциплины и само название. Естественно, что эти заявки рассматривались в рамках тех технических областей, на базе которых формировались соответствующие подотрасли нанотехнологий. Например, большинство изобретений и открытий, касающихся наноструктур и наночастиц, было сделано в результате исследований в области физики твердого тела; то же самое можно сказать в отношении изобретений и открытий, касающихся nanoорганических материалов, которые первоначально совершались в области микробиологии или биотехнологии. Аналогично, большинство применений наноматериалов, например, в виде сверхтонких покрытий, порошков или композитов осуществлялось и продолжает осуществляться до сих пор в рамках соответствующих традиционных областей техники.

Взаимосвязь нанотехнологий с традиционными областями хорошо видна на примере развития патентных классификаций [2]. Так, в патентной классификации США [3] уже давно существует класс 257 "Активные твердотельные устройства", который исчерпывающим образом отражает следующую тематику: квантовые источники; квантовые барьеры; суперрешетки; устройства, имеющие буферные слои в виде нанолитов; нанолиты, используемые в качестве светоотражающих, рефракционных слоев; электронно-полевые эмиттеры и т. д. Поэтому экспертам США, проводящим экспертизу изобретений в области нанотехнологий, рекомендуется для целей классифицирования и поиска, помимо основного класса 977, посвященного нанотехнологиям, использовать и просматривать множество других классов и подклассов, которые могут содержать объекты и процессы, относящиеся к нанотехнологиям.

Во-первых, это классы, которые наряду с общими свойствами и характеристиками материалов могут касаться материалов, содержащих наночастицы и наноструктуры (например, сплавы, ламинаты, слоистые изделия, композиты, порошки, покрытия и т. п.), т. е. при изготовлении которых могут использоваться наночастицы и наноматериалы.

Во-вторых, сюда относятся классы, характеризующие способ и средства изготовления или обработки материалов, например, поверхностная обработка металлов (путем напыления, эпитаксии, осаждения слоев толщиной в один атом); выращивание кристаллов, использование процессов термолиза и химической декомпозиции и т. д.

В-третьих, в это число входят классы, посвященные способам и средствам измерения, тестирования и диагностики материалов, в том числе и наномате-

риалов. Среди них, например, подкласс 105-73, посвященный измерению с помощью атомно-силовых микроскопов; подкласс 310-311, характеризующий пьезоэлектрические устройства, используемые для обеспечения позиционирования сканирующих микроскопов с наноточностью; подклассы 324-244, 260, 300-322, содержащие сведения соответственно о магнитно-силовых и электронных микроскопах на основе парамагнитного резонанса; подклассы 250-306 и 307, посвященные сканирующим туннельным микроскопам и способам их использования, и многие другие. Наконец, имеется много классов, отражающих применение наноматериалов и нанобъектов в различных устройствах и в различных областях технологии. Сюда, в первую очередь, относятся, подклассы, посвященные полностью элементарным наноструктурам как, например, подкласс 423-445, характеризующий фуллерены в чистой форме, так и классы, которые лишь частично освещают применение наноструктур, например, класс 372, посвященный генераторам когерентного света за счет использования квантовых колодцев и барьеров; класс 385, посвященный оптическим волноводам, содержащим нанолиты, которые обеспечивают функции рефракции, отражения и светозащиты; класс 502, описывающий катализаторы, твердые сорбенты, в которых используется свойство нанопор. Обширной областью применения нанотехнологий является медицина: классы 514 (лекарственные составы, содержащие радионуклидные включения в виде микрокапсул, микросфер); класс 600 (хирургия), включающий подклассы, посвященные измерению и обнаружению составляющих элементов в жидкости и крови тела; протезирование и т. п.

Наличие таких рубрик в существующих патентных классификациях объясняет тот факт, что специальный класс В82 "Нанотехнология" был введен в Международную патентную классификацию (МПК) сравнительно поздно, лишь в 2000 году. В определении данного класса, содержащего две основные группы, касающиеся наноструктур, а также их изготовления или обработки, указывается, что он предназначен для классифицирования и поиска изобретений, которые относятся собственно к нанотехнологиям. При этом четко указывается на разграничение данного класса с традиционными областями, в которых подавались ранее и по-прежнему подаются заявки на изобретения, которые в той или иной степени можно отнести к нанотехнологиям. В первую очередь, это касается химических или биологических структур (соответственно классы МПК С08 и С12). Основными признаками для отнесения изобретения к классу нанотехнологий является наличие у вещества особой атомарной или молекулярной структуры в нанодиапазоне, которая обуславливает особые физико-химические свойства (сверхпрочность, сверхпроводимость, гигантское магнитное сопротивление и т. д.), а также манипуляция веществом в нанодиапазоне в целях получения или обра-

ботки особых наноструктур. В МПК, также как и в классификации США существует большое число рубрик, которые содержат изобретения, относящиеся к нанотехнологиям, хотя не всегда признак "нано" выражен в явном виде, например: микрокапсулы для медицинских препаратов (А61К 9/51); пленки Ленгмюра-Блоджетт (В05D 1/20); углеродные наноструктуры, например, баккиболлы, нанотрубки, наноспираль и т. п. (С01В 31/02); устройства и техника зондового сканирования (G01Q); оптические квантовые колодцы (G02F 1/017); наноструктурные сверхтонкие магнитные пленки (H01F 10/32); молекулярно-лучевая эпитаксия (H01F 41/30); квантовые проводники (H01L 29/775) и т. д.

В связи с такой двойственной природой нанотехнологий среди патентоведов до сих пор продолжают споры относительно того, какие изобретения следует относить к собственно нанотехнологиям, а какие из них относятся к традиционным областям знаний. Сторонники более традиционного подхода, критикуя попытки чрезмерного расширения понятия нанотехнологий, указывают на то, что многие химические и биологические структуры при использовании нестрогих критериев могут удовлетворять определению наноструктур. Аналогичные взгляды относительно расширенного толкования нанотехнологий высказываются также на страницах специализированных изданий научно-технической литературы. Например, в работе [4] авторы, проведя сравнение различных определений нанотехнологий, приходят к выводу, что "нанотехнология — это искусственно выделенное понятие, которое включает в себя огромный набор разнородных способов, инструментов и объектов в различных отраслях науки, техники и промышленности, объединенных только контролируемым получением в объектах структурных элементов с размером, хотя бы в одном измерении, менее 100 нм". В историческом плане авторы указывают на взаимосвязь нанотехнологий с коллоидной химией, изучающей объективные физические и химические закономерности гетерогенного ультрадисперсного состояния вещества, высокомолекулярных соединений и межфазовых поверхностей.

Однако очевидно, что независимо от исхода подобных споров, число технических областей, в которых находят применение нанотехнологические способы создания новых материалов и их обработки, постоянно возрастает.

Это не мешает большинству патентоведов придерживаться мнения, что с учетом тесной взаимосвязи нанотехнологий с традиционными областями и вытекающей из этого двойственной природы "наноизобретений", соответствующие заявки должны рассматриваться, как правило, в соответствующих традиционных областях техники.

Одновременно признается важность и необходимость мониторинга изобретений, относящихся к нанотехнологиям. С этой целью в рамках процесса постоянного пересмотра МПК недавно было предло-

жено предусмотреть возможность вторичного (или дополнительного) классифицирования изобретений признаками (или точнее сказать метками), обозначающими особые наносвойства, а также получение и применение наноструктур и наноматериалов в различных областях техники.

Использование таких меток уже практикуется в рамках патентной классификации Европейского патентного ведомства (ЕПВ), эта классификация представляет собой расширенный вариант МПК [5].

Простановка таких меток на патентных документах в дополнение к основным рубрикам позволяет определить приблизительное число патентов, выданных в различных отраслях нанотехнологий, а также их рассеяние по другим (традиционным) областям техники.

К середине 2008 года мировой патентный фонд, по данным ЕПВ, содержал более 100 тысяч патентных документов, которые были выданы на основе исходных 25 тысяч изобретений.

Статистика патентования, исходя из использования меток ЕПВ (они обозначены ниже через общий индекс Y01N), выглядит следующим образом:

- Y01N2 Нанобиотехнология — 17,6 тыс.;
- Y01N4 Нанотехнология для обработки, хранения и передачи информации — 39,2 тыс.;
- Y01N6 Нанотехнология материалов и обработки поверхностей — 41,5 тыс.;
- Y01N8 Нанотехнология для обеспечения взаимодействия, регистрации или активации частиц — 15,2 тыс.;
- Y01N10 Нанооптика — 22,8 тыс.;
- Y01N12 Наномагнетизм — 18,2 тыс.

Из этих статистических данных видно, что наиболее активными областями патентования являются нанoeлектроника и нанотехнология материалов. До этого по данным на 2004 год наиболее активными областями патентования были следующие:

- использование наночастиц;
- способы использования углеродных нанотрубок, их производства или очистки;
- использование нанотрубок для производства электродов;
- биологические и химические методы обнаружения и диагностики, основанные на нанотехнологиях;
- способы направленной доставки лекарств. Общее число выданных патентов и поданных заявок на тот момент составляло лишь 20 000, т. е. за 4 года произошло пятикратное увеличение патентных документов.

Из статистики подачи заявок, поступающих в ЕПВ из различных стран, можно с достаточной степенью уверенности также судить об уровне развития нанотехнологий в соответствующих странах: США — 49 %; Япония — 25 %; страны, входящие в Европейскую патентную организацию (ЕПО), — 18 % (Германия — 8 %, Франция — 4 %, Великобритания — 3 %), Корея — 2 % и прочие страны — 6 %. В целом

бесспорным лидером патентования во всем мире в области нанотехнологий является США: более 60 % выданных в мире патентов принадлежат патентовладельцам из этой страны [6].

Наблюдается тенденция бурного развития нанотехнологий в Китае. По числу патентных заявок Китай занимает третье место в мире, после США и Японии. Сегодня в Китае несколько сотен предприятий занимаются освоением и производством нанопродукции. Россия сравнительно недавно присоединилась к пулу стран, участвующих в этой гонке. Федеральная целевая программа "Развитие инфраструктуры наноиндустрии в РФ на 2008—2010 годы", которая была принята в 2007 году, и создание государственной Российской корпорации нанотехнологий, и даже выделение значительного финансирования, естественно, не могли существенно повлиять сразу на положение с нанотехнологиями в нашей стране. Поэтому число патентов, полученных российскими заявителями в России, весьма скромное — около 300.

Высокую мировую активность патентования в сфере нанотехнологий можно объяснить несколькими причинами [7]. Во-первых, по сравнению с другими областями наблюдается упреждающее патентование базовых идей, реализованных практически в лабораторных условиях. Особенно это характерно для применения наноматериалов. Во-вторых, отличительная особенность патентования в области нанотехнологий связана с ее ярко выраженным междотраслевым характером. В отличие от других новых, ранее возникших областей техники, в которых патентование осуществлялось реальными производителями преимущественно в своей области, патентообладатели в области нанотехнологий часто получают исключительные права не только в отношении своей основной отрасли промышленности, но также в отношении многих других отраслей, исходя из потенциальных или предполагаемых сфер применения. Так, например, возможна ситуация выдачи патента на базовое изобретение, касающееся наноструктуры полупроводника, которое может применяться также в биотехнологии, телекоммуникации, текстильной промышленности и т. д. В-третьих, в связи с тем, что ряд стран, осуществляющих государственное финансирование исследований в области нанотехнологий, проводимых университетами, предоставляет им право получать патенты на свое имя и заключать лицензионные соглашения (например, в США в соответствии с Актом Бэя—Доуля), то, естественно, для университетов появился коммерческий интерес активно заниматься патентованием и лицензированием.

Вместе с тем, определенным сдерживающим фактором патентования в области нанотехнологий является наличие патентов на пионерные изобретения или патентов с широкими притязаниями, препятствующими разработке изобретений на усовершенствования в соответствующей отрасли. Извест-

но, что отрасль промышленности развивается бурно, если имеется возможность патентовать изобретения на усовершенствования. В этой связи показательна жалоба исполнительного директора альянса "Нано-бизнес", который заявил, что блок первых патентов по нанотехнологиям был выдан с такими широкими притязаниями, что промышленность потенциально находится в реальной опасности замедления развития ввиду правовых барьеров [8].

Как известно, охрана результатов научно-технической деятельности (РНТД), в частности, потенциально охраноспособных объектов интеллектуальной собственности (ИС), например изобретений и полезных моделей, может осуществляться разными способами: с помощью авторского права, патентной охраны или сохранения РНТД в виде коммерческой тайны, например, в качестве секретов производства.

Указанные способы являются альтернативными и в определенном смысле взаимоисключающими.

Публикация РНТД в периодической печати, будучи наиболее очевидной и доступной процедурой, обеспечивающей признание и уважение для ученого, иногда необоснованно рассматривается как завершающая стадия научных исследований, некоторым своеобразным внедрением научных исследований. Кроме того, считается, что ценность РНТД, лежащих в основе публикации, тем выше, чем больше цитируется данная публикация, о чем говорилось в статье [9]. Следует отметить, что цитирование патента как свидетельство экономической значимости и отдачи РНТД является не менее важным, а порой более значимым показателем в оценке соответствующих работ. В отличие от публикаций в научно-технической литературе, в которых ссылка приводится только самим автором, в патентах могут присутствовать два вида ссылок: ссылки, сделанные автором, и ссылки, приведенные экспертом по результатам патентного поиска, при этом и автор, и эксперт указывают на различия данного изобретения от предшествующих с помощью отличительных признаков. Ссылки в каждом последующем изобретении на его предшествующее (именуемое обычно прототипом) позволяют выявить целую цепочку взаимосвязанных изобретений, выйти на пионерное изобретение в данном техническом направлении и, по сути, раскрыть характер дальнейшего развития данного технического направления. По числу патентных ссылок можно также судить о важности запатентованной технологии. Число ссылок для одного и того же изобретения возрастает при обработке патентов-аналогов.

Охрана с помощью авторского права наступает автоматически при публикации материала в научно-технической литературе или депонировании. Однако такая публикация закрепляет, в первую очередь, право авторства и не обеспечивает получение имущественных прав (в частности, исключительного (монопольного) права использования изобретения, запрет на использование данного изобретения другими, право продажи лицензии и т. п.). Более того,

преждевременная публикация изобретения в научно-технических изданиях до подачи заявки на изобретение в патентное ведомство может препятствовать выдаче патента, если пропущен льготный период в 6 месяцев. Так, подав заявку на получение патента, автор может с удивлением обнаружить, что в заключении экспертизы указывается на отсутствие новизны и в качестве известного уровня техники ему противопоставлена публикация, которую он поторопился сделать. Кроме того, преждевременная публикация может быть своеобразным подарком для конкурентов: на основе сведений в статье бывает возможным сделать усовершенствования, которые могут быть запатентованы. Правда, иногда имеются случаи, когда сознательно прибегают к публикации и соответственно раскрытию новизны с тем, чтобы воспрепятствовать конкурентам в дальнейшей разработке и совершенствовании определенной технологии и ее патентовании. Для этого крупные фирмы, обладающие значительным технологическим заделом и соответствующим ноу-хау в виде секретов производства, печатают так называемые "защитные публикации" в своих ведомственных журналах или подают заявки на получение так называемых "предварительных патентов" (например в США), которые обеспечивают им временное преимущество перед конкурентами.

Охрана результатов научно-технической деятельности в качестве секрета производства предусмотрена Законом РФ "О коммерческой тайне" (от 29.07.2004 г. № 98-ФЗ), а также частью 4 Гражданского кодекса РФ (Глава 75 "Право на секрет производства", статьи 1465-1472). Так, в условиях быстрого морального устаревания некоторых видов техники, как например, в случае отдельных функциональных (электронных) блоков или интегральных схем ЭВМ (по некоторым оценкам, потребительская ценность компьютера уже через два года становится практически равной нулю), бывает целесообразным не публиковать и не регистрировать РНТД в качестве патентных прав, а сохранять их в качестве коммерческой тайны или производственного секрета (ноу-хау). Это помогает избежать прямых расходов, которые возникают в случае с патентованием, однако для этого необходимо обеспечить соблюдение ряда правовых требований.

Требуется, чтобы соответствующая конфиденциальная информация отвечала трем требованиям: 1) она имеет действительную или потенциальную коммерческую ценность в силу неизвестности третьим лицам; 2) к ней нет доступа на законном основании; 3) ее обладателем введен режим коммерческой тайны. Что касается затрат, то их совсем избежать не удастся, поскольку необходимо обеспечить инвестиции в физическую безопасность охраняемого объекта, подготовку соглашений о конфиденциальности, а также нести затраты на мониторинг и обеспечительные меры по защите прав. Несмотря на то, что сохранение потенциального изобретения в

тайне в качестве секрета производства дает определенную защиту от нарушений против несанкционированного разглашения теми, кто связан обязательствами конфиденциальности (это, в первую очередь, касается сотрудников данного предприятия, партнеров по бизнесу и т. д.), но нет гарантий, что аналогичное изобретение не будет вторично сделано другим лицом независимо от обладателя тайны, и более того, что оно не будет запатентовано. Выдача патента другому лицу хотя и не запретит обладателю секрета дальнейшее использование своего же изобретения благодаря праву преждепользования, однако не позволит вам расширять объемы производства.

С учетом специфического характера наноизобретений, а также благодаря тому, что в отличие от традиционных объектов большинство нанопродуктов с трудом поддаются обратному реинжинирингу (т. е. декомпиляции, или разложению на составляющие компоненты, и последующему воссозданию объекта), есть основания предполагать, что в отношении соответствующих технологий частные фирмы так и поступают, т. е. сохраняют их в качестве коммерческих или производственных секретов [10].

В отличие от авторского права, где правообладателю, как правило, полагается определенное вознаграждение за публикацию, получение патента, напротив, требует затрат от заявителя и обычно бывает весьма дорогостоящим мероприятием, особенно если охрана испрашивается во многих странах. В качестве вознаграждения заявитель получает монопольное (исключительное) право использовать данное изобретение самому, а самое главное, разрешать или запрещать использование другим. Как правило, в стоимость получения патента входит пошлина за подачу заявки, экспертизу на новизну, изобретательский уровень и промышленную применимость изобретения, его публикацию, ежегодные пошлины за поддержание патента в силе, а также расходы на услуги патентного поверенного, перевод на иностранные языки в случае зарубежного патентования. Кроме того, в случае, когда для предотвращения нарушений патента возникает необходимость обращения в суды, дорогостоящей может оказаться защита прав, вытекающих из патента.

Исходя из самих общих подсчетов минимальных затрат стоимость патентования одного изобретения в 3—4 странах может достигать 65 000 долл. Кроме того, как только будет выдан патент, необходимо уплачивать также ежегодные пошлины и/или пошлины за продление, обычно один раз в год, причем эти пошлины возрастают обычно в течение жизненного цикла патента, который в целом может составлять до 20 лет с даты подачи заявки. Самыми высокими являются затраты в промышленно развитых странах Европы, США и Японии.

Сумма на патентование во многом зависит от числа стран, в которых испрашивается патентная охрана, а также от того, с какими трудностями заявитель столкнется при получении патента (например,

внесение значительных поправок в заявку по возражениям патентного эксперта, подготовка правового обоснования или привлечение юридической помощи в случае, когда конкуренты оспаривают или подают возражение против выдачи патента).

Обычно бывает значительно дешевле испрашивать патентную охрану только у себя в стране, но в этом случае приходится мириться с потенциально свободным использованием своего изобретения в любой другой стране. Поскольку общая стоимость патентования в нескольких странах обычно выходит за пределы ресурсов многих заявителей, за исключением крупных компаний и исследовательских учреждений, то большинству предприятий и институтов необходимо своего рода коммерческое партнерство или финансовая поддержка по получению и поддержанию в силе патентных прав. Патентование является фактически первым этапом коммерциализации изобретения. Имеется немало случаев, когда запатентованные изобретения потенциально могли бы быть успешными с точки зрения их реализации, но не получают дальнейшего развития, поскольку изобретатель или заявитель не имел достаточных мощностей, ресурсов или умения осуществить коммерческую разработку своего изобретения.

Вместе с тем, патенты представляют собой признание изобретательского вклада, но никак не отражают коммерческой ценности самого изобретения. К сожалению, многие запатентованные изобретения оказываются в технологическом отношении бесперспективными или коммерчески нежизнеспособными.

Мировая практика свидетельствует, что число изобретений, получающих коммерческую реализацию, составляет менее 20 % от общего числа патентуемых изобретений. Иными словами, патентные права сами по себе не гарантируют финансовых поступлений по запатентованному изобретению. Поэтому патентование не должно быть самоцелью или проводится на всякий случай с расчетом, что кто-нибудь заинтересуется вашим изобретением. Для того чтобы извлечь финансовую выгоду из патентных прав на ИС, заявителю необходимо принять правильные коммерческие решения. В противном случае вместо ожидаемых доходов от многолетней упорной работы по созданию изобретения, оно может стать обузой.

В настоящее время для обеспечения высокой конкурентоспособности РНТД существует стандарт ГОСТ Р15.011—96 "Патентные исследования. Содержание и порядок проведения". Он предусматривает проведение патентных исследований, начиная с исследования тенденций и выбора актуальных направлений финансирования будущих разработок, включая общее и частное планирование работ, кончая разработкой технической документации, патентованием и лицензированием. Особенно важны патентные исследования на этапе выбора альтернативных решений. Так, например, на начальном этапе

планирования и выбора наиболее экономичных направлений может оказаться наиболее рациональным подходом, наряду с проведением самостоятельных исследований, не дублировать уже проведенные в мире работы, а приобрести соответствующие лицензии и технологии, как это делается, например, в Китае. На заключительном этапе НИР и ОКР, когда определяются объекты для патентования и лицензирования, патентные исследования позволяют выявить обходные решения в отношении существующих патентов и тем самым также сэкономить значительные ресурсы при зарубежном патентовании. Заключительным этапом патентных исследований, подтверждающим эффективность и высокий уровень РНТД, является факт подачи заявок на изобретения, которые подвергаются строгой патентной экспертизе в Роспатенте по критериям мировой новизны и изобретательского уровня, что позволяет объективно подтвердить достигнутый мировой уровень.

К сожалению, в настоящее время строгое выполнение данного стандарта по разным причинам (финансовым, кадровым и т. д.) зачастую не осуществляется. Более того, имеют место многочисленные случаи отрицательного опыта финансирования работ, связанных с патентными исследованиями, по остаточному принципу. Часто упускаются из виду высокие расходы на зарубежное патентование (примерно 15–35 тыс. долл. на одно изобретение при патентовании в одной стране). Поэтому при планировании НИР и ОКР в области нанотехнологий целесообразно предусмотреть обязательное включение патентных исследований в качестве самостоятельного этапа работ с отдельно выделенным финансированием.

Эффективному проведению патентных исследований препятствует также отсутствие необходимых патентных кадров и недостаточная патентная грамотность в организациях-разработчиках, что часто приводит к элементарным причинам отказа в выдаче патента российским ученым, как, например, преждевременное раскрытие существа изобретения в научно-технических журналах до подачи заявки на изобретение.

Для обеспечения организационной поддержки патентных исследований представляется необходимым восстановить или создать заново патентные службы, по крайней мере, в составе основных организаций-исполнителей ФЦП "Развитие инфраструктуры nanoиндустрии в РФ", которые будут содействовать ученым и разработчикам, работающим по Программе, проводить соответствующие патентные исследования в соответствии со стандартом ГОСТ Р 15.011–96.

В целом, патентные исследования, проводимые как составная часть научно-исследовательских работ, позволяют получить следующие результаты:

- определить уровень техники в части предпринимаемого исследования;

- исключить дублирование усилий в части исследований;
- выявить возможные незанятые ниши на рынке;
- провести маркетинговые исследования;
- изучить тенденции инвестирования и развития соответствующих технологий;
- выявить потенциальных конкурентов и установить потенциальных партнеров в части исследований или коммерциализации.

В основе патентных исследований лежит изучение патентной документации в данной области техники. Для нахождения нужной документации проводятся различные виды патентного поиска:

- тематический (предметный) поиск описаний изобретений в соответствии с заданной темой или разрабатываемым объектом техники;
- именной (фирменный) поиск описаний изобретений по имени изобретателя или патентообладателя (заявителя);
- нумерационный поиск, когда описания изобретения отбираются по номерам охранного документа (авторского свидетельства, патента, заявки);
- поиск патентов-аналогов (то есть патентов на одно и то же изобретение, выданных в разных странах); поиск проводится по следующим признакам: совпадение номера конвенционной заявки, даты и страны приоритета, совпадение наименования заявителя и фамилий авторов изобретений;
- патентно-правовой поиск, в основе которого лежит срок действия патента и другие юридические правила, установленные патентными законами, действующими в странах поиска;
- поиск сведений об использованных изобретениях в РФ;
- поиск переводов иностранных патентов.

Наиболее важным является тематический поиск. Сложность проведения патентного поиска определяется тем, что с точки зрения тематики сфера нанотехнологий, без сомнения, является многоотраслевой или междисциплинарной.

Для обеспечения тематического (классификационного) поиска изобретений в области нанотехнологий в рамках МПК, как было указано выше, был введен специальный класс В82 "Нанотехнология", используемый для классифицирования и поиска изобретений, касающихся характеристики наноструктур, их изготовления или обработки преимущественно на основе индивидуального манипулирования атомами и молекулами (то есть "снизу-вверх"). Однако введение этого класса не решило проблемы рассеяния информации по другим рубрикам МПК, отражающим получение и обработку наноструктур и наноматериалов иными способами (то есть "сверху-вниз"), используемыми традиционно в других отраслях техники, например, химический синтез, катализ, травление, литография, протеиновое конструирование, поверхностная обработка металлов, изготовление композитов и т. д.

С этой целью в рамках МПК был начат пересмотр класса В82, в результате которого, предположительно, должны появиться рубрики, аналогичные меткам Y01N в классификации ЕПВ (ECLA), перечень которых приведен в начале статьи в связи со статистикой патентования в данной сфере.

Патентное ведомство США разработало в рамках своей национальной классификации специальный, очень детализированный класс 977, посвященный объектам нанотехнологии (более 250 детальных рубрик). Данный класс не используется самостоятельно, а лишь в сочетании с другими классификационными рубриками.

Класс 977 включает следующие тематические направления изобретений, попадающих в область нанотехнологии:

- (i) Исходные наноструктуры и химические композиции наноструктур
- (ii) Устройства, которые включают по крайней мере одну элементарную наноструктуру
- (iii) Математические алгоритмы, например, программное обеспечение и т. п., специально разработанное для моделирования конфигураций или свойств наноструктур
- (iv) Способы или устройства для производства, обнаружения, анализа или обработки наноструктуры
- (v) Специфические или особые использования наноструктур.

Результатом патентного поиска является, как правило, оценка патентной ситуации в области развития данного вида техники с исследованием активности изобретательства, патентной политики ведущих стран (взаимное патентование) и зарубежных фирм, определяющих техническую политику, выявления блоков действующих важнейших патентов. Разновидностью тематического поиска является поиск по патентным ссылкам, который используется в следующих целях:

- установление известного уровня техники или действительности патента;
- выявление и оценка деятельности основных конкурентов;
- мониторинг патентного портфеля для выявления возможных правонарушений;
- оценка значимости изобретений по числу патентных ссылок.

На основе проведенной оценки, особенно в части технико-экономического обоснования включения темы в план разработок или ее продолжения, могут быть решены следующие задачи:

- выполнение новой разработки в полном объеме или ее части;
- приобретение образцов зарубежной техники;
- покупка лицензий;
- импорт оборудования или продукции.

Патентные исследования заканчиваются подачей заявки на изобретение, по которой проводится патентная экспертиза. В результате экспертизы опре-

деляется, удовлетворяет ли объект изобретения условиям патентоспособности, а именно: обладает ли он существенной новизной, достигнут ли соответствующий изобретательский уровень и является ли он промышленно применимым.

При патентовании необходимо избегать ряда типичных ошибок. О двух из них было сказано выше, а именно, когда, во-первых, до патентования стремятся опубликовать в опережающем режиме сведения о результатах разработок, что приводит к потере новизны и отказу в выдаче патента из-за отсутствия новизны, и, во-вторых, не зарезервированы достаточные финансовые средства на цели патентных исследований и патентование, особенно для целей зарубежного патентования, которое может стоить очень дорого.

Другими типичными упущениями являются следующие:

1. К патентованию приступают достаточно поздно — по завершению научно-исследовательских разработок и создания опытного образца.

2. В случае сложного объекта пытаются получить охрану только на объект в целом, подавая одну заявку, забывая о составляющих способах, процессах и узлах.

3. Попытки обойти существующие запатентованные решения предпринимаются слишком поздно, когда основные результаты исследований практически завершены.

4. При зарубежном патентовании упускают из виду многие важные моменты, как например, соблюдение приоритетного срока (12 месяцев), использование многосторонних процедур патентования (например, процедуры РСТ).

Патентование, начиная с выбора стран патентования, является лишь одним из этапов общеэкономической стратегии разработки и реализации разрабатываемой технологии или продукта, его коммерциализации [11]. Патентование созданного изобретения может быть бесполезным и на деле привести к пустой трате ресурсов в том случае, если не будет разработана общая коммерческая стратегия, в рамках которой программа патентования занимает логическое место.

Для определения целесообразности патентования вашего изобретения необходимо ответить на следующие вопросы.

- *Какова взаимосвязь вашей технологии с другими объектами или технологиями*, т. е. потребуется ли для внедрения вашего изобретения доступ к другим охраняемым технологиям или ноу-хау; необходимо ли использование особых производственных технологий для того, чтобы реализовать изобретение экономным способом и обеспечить конкурентоспособную цену для вашего продукта?
- *Какова степень конкуренции*: предстоит ли вашему продукту занять место на переполненном рынке с высокой конкуренцией, потребуется ли поддерже-

ка и ресурсы какой-нибудь другой крупной компании в данной области?

- *Диапазон возможных применений вашего изобретения:* имеете ли вы возможность реализовать ваше изобретение во всех областях, где оно применимо, или вам потребуется установление партнерства с другими фирмами для обеспечения внедрения вашего изобретения с полной потенциальной отдачей?
- *Каковы Ваши возможности по организации производства за рубежом или экспорта,* т. е. имеются ли у вас возможности производства, экспорта или маркетинга вашего изобретения на рынках основных зарубежных стран?

В целом, для коммерциализации продукта или технологии, основанных на вашем изобретении, существуют следующие опции:

- **передача патентных прав по лицензии** (права, вытекающие из патента, могут быть предоставлены другим лицам (организациям) по лицензии — либо частично, либо полностью, на исключительной основе или нескольким сторонам). Эта процедура обычно называется **лицензированием**. Лицензия является выдачей разрешения на реализацию любых прав, принадлежащих патентовладельцу, лицензии могут быть исключительными и неисключительными;
- **переуступка ваших прав** (охранное право, такое как патент может быть переуступлено или права собственности переданы другой стороне. Это может быть сделано в обмен на финансовую компенсацию или иное ценное предложение, как, например, акции в данной компании). В противоположность лицензированию (пере)уступка прав ИС является фактически продажей этих прав;
- **образование совместного венчурного предприятия**, в рамках которого можно эффективно объединить патентные права с материальными ресурсами партнера для разработки и использования новой технологии;
- **создание своей собственной компании по использованию данной технологии**. Часто это называется "раскруткой" нового бизнеса или новой компании, такой подход может быть принят исследовательскими организациями и университетскими подразделениями, когда они создают подходящую коммерческую структуру для внедрения своей новой технологии, тем самым, отделяя фундаментальные исследования от прикладных разработок и коммерциализации.

Заключение лицензионного соглашения представляет собой распространенный способ реализации патентных прав. В соглашении указываются следующие основные позиции: наименование прав, передаваемых по лицензии, владелец прав, размер роялти, территория, к которой применима лицензия, является ли лицензия исключительной или не исключительной, кто должен оплачивать расходы по поддержанию патентных прав, вопросы конфи-

циальности и публикации, страхование, объем уступаемых прав и возмещение ущерба, а также разрешение споров и окончание действия лицензии.

При поиске партнеров необходимо оценить степень завершенности разработки соответствующей технологии, предлагаемой для коммерциализации. Для этого необходимо ответить на следующие вопросы.

- На какой стадии находится изобретение? Является ли оно еще неподтвержденным результатом научных исследований или результатом, который в принципе подтвержден, но не полностью испытан на практике, или это уже полностью действующий прототип, близкий к потребительскому продукту? Сколько еще дополнительных исследований и разработок потребуется, и каковы шансы на успех?
- Какова степень риска, каков объем будущих обязательств и финансовых вложений ожидается от партнера? Потребуется ли от партнера финансирование на продолжение исследований или только организация использования данного изобретения на основе уже существующих технологий? Получены ли уже патентные права, или их оформление находится на стадии рассмотрения заявки без какой-либо гарантии, что по ней будут выданы охранные документы в будущем?

Короче говоря, если партнера по бизнесу просят обеспечить лишь выход на рынок технологии, которая уже хорошо отработана, опробирована в техническом отношении и по ней получены патенты в основных странах рынков сбыта, то коммерческий партнер берет на себя сравнительно небольшой риск, и это должно быть отражено в условиях соглашения. Однако, если коммерческого партнера просят профинансировать продолжение незаконченных научных исследований, результат и эффективность которых неочевидны, то он вправе рассчитывать на большую долю в получении прав ИС и ожидать, что вознаграждение за более высокие риски будет большим в перспективе.

В заключение, отвечая кратко на вопрос, поставленный в названии статьи, можно резюмировать следующим образом. Публикация в открытой печати подробной информации о результатах научно-технической деятельности, как правило, целесообразна после того, как подана заявка или заявки на получение патентной охраны соответствующего(ие) изобретения(й), что позволяет избежать преждевременного раскрытия существа изобретения. До этого желательна публикация, в основном, общих сведений, касающихся подхода, возможных способов осуществления технического объекта или технологии без приведения существенных признаков. Вопрос о целесообразности патентования должен решаться в рамках общей стратегии коммерциализации будущего продукта или технологии и проведения соответствующих патентных исследований. Патентование без коммерческой проработки и изучения рынка на

всякий случай, с расчетом, что кто-либо заинтересуется вашим изобретением, может привести лишь к неоправданным затратам на патентование. И наконец, вариант сохранения соответствующей технологии в режиме коммерческой тайны возможен в том случае, если существует достаточная уверенность в оригинальности разработанной технологии, ее труднодоступности для третьих лиц и сложности ее воссоздания и повторения на основе изучения соответствующего продукта, предназначенного для коммерциализации. Одновременно надо помнить о возможных рисках и последствиях такого подхода, главными из которых является вероятность патентования аналогичной технологии третьими лицами и, как следствие, запрет на расширение вашего производства и экспорт продукции в другие страны.

Список литературы

1. Scheu M. and other. Mapping nanotechnology patents: The EPO approach // World Patent Information — 28 (2006). P. 204
2. Ненахов Г. С., Негуляев Г. А., Цикунова Л. А. Нанотехнологии: существующие методы классифицирования и

поиска патентных документов. М.: Изд. ОАО ИНИЦ "Патент", 2009 (в печати).

3. New Cross-Reference Digest for Nanotechnology — <http://www.uspto.gov/web/patents/biochempharm/crossref.html>

4. Врублевский Э. М., Киреев В. Ю. и др. Нанотехнология — путь в будущее или бренд для финансирования? // Нано- и микросистемная техника. 2007. № 12. С. 6—19.

5. European Classification (ECLA) — http://ep.espacenet.com/help?topic=ecla&method=handleHelpTopic&locale=en_ep

6. Koppikar Vivek. Current trends in Nanotech Patents: a view from the inside the Patent Office/ Maebius Stefan // Nanotechnology Law & Buseness. 2004. V. 1. Issue 1. P. 213.

7. Results from the international workshop "IPR" in nanotechnology — lessons from experiences worldwide // World Patent information. 2007. 29. P. 395.

8. Mullaly V., Winn D. Patenting Nanotechnology: a unique Challenge to IP Bar // New York Law Journal. 2004. July 6. P. 12.

9. Андриевский Р. А. О цитировании результатов российских исследований в области нанотехнологии. // Нано- и микросистемная техника. 2007. № 11. С. 2—4.

10. Негуляев Г. А., Ненахов Г. С. Нанотехнологии: проблемы патентования и экспертизы. Ч. 1. Ч. 2. // Патенты и лицензии. 2007. № 11; 2008. № 1.

11. Wartburg, von Iwan, Teichert Thorsten. Valuing patents and licenses from a business strategy perspective — Extending valuation considerations using the case of nanotechnology // World Patent Information. 2008. 30. P. 106.

НАНОТЕХНОЛОГИИ И ЗОНДОВАЯ МИКРОСКОПИЯ

УДК 621.385.833

И. И. Бобринецкий, канд. техн. наук, докторант,
В. К. Неволин, д-р физ.-мат. наук, проф.,
К. В. Горшков, студент,
Д. А. Данькин, студент,
МИЭТ, г. Москва (Зеленоград)
E-mail: bobrinet@mail.ru

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ МЕТОДА ДИЭЛЕКТРОФОРЕЗА ПРИ ФОРМИРОВАНИИ ИНТЕГРАЛЬНЫХ СТРУКТУР НА ОСНОВЕ УГЛЕРОДНЫХ НАНОТРУБОК

Разработана методика диэлектрофореза для контролируемого и одновременного осаждения различного типа углеродных нанотрубок на пластине, содержащей матрицу подводящих электродов. Предложены варианты геометрии электродов, обеспечивающие формирование структур на основе одиночных нанотрубок или их сеток. Продemonстрирована возможность применения метода диэлектрофореза для интеграции углеродных нанотрубок в стандартные процессы микроэлектроники.

Ключевые слова: нанотрубки, сенсоры, диэлектрофорез, микроэлектроника.

Введение

Углеродные нанотрубки с момента их открытия в 1991 г. [1] рассматриваются как перспективный материал для применения в элементах электроники [2], сенсорной техники [3], композитных структурах [4], зондовой микроскопии [5]. Ранее авторами были продемонстрированы положительные лабораторные результаты применения нанотрубок в транзисторах [6], сенсорных системах [7], датчиках температуры и влажности [8, 9]. Тем не менее, методы, используемые в лабораторных условиях, должны быть применимы в процессах создания интегральных структур и совместимы с технологией современной микроэлектроники и микросистемной техники.

При интеграции материала углеродных нанотрубок в стандартный процесс кремниевой технологии необходимо решить следующие задачи:

- добиться совместимости процесса получения материала углеродных нанотрубок с процессами кремниевой технологии;
- разработать методы по созданию углеродных нанотрубок с заданными физическими параметрами;
- разработать методы по интеграции углеродных нанотрубок на заданных площадях с известной плотностью, ориентацией и свойствами.

Для решения данных задач предлагается несколько методов. Одним из них является непосредственное выращивание нанотрубок в точках, заданных катализатором, сформированным одним из известных литографических методов [10]. Однако задача совместности процесса роста углеродных нанотрубок, а именно — его высокой температуры, с используемыми традиционными материалами не решена.

Другими эффективными методами являются использование химической обработки, а также позиционирование углеродных нанотрубок в магнитных и электрических полях [11]. В последнем случае перспективен метод электрофореза в постоянном или переменном поле (диэлектрофорез) [12]. Данный метод широко применяется для манипулирования и позиционирования различных нанообъектов в нанотехнологии, биологии и медицине [13]. Наибольшее число публикаций посвящено именно диэлектрофорезу углеродных нанотрубок как наиболее контролируемому электрокинетическому методу, позволяющему варьированием амплитудой колебаний задавать число нанотрубок, высаживаемых в заданной области [14]. Также было показано, что диэлектрофорез является эффективным инструментом сепарации полупроводниковых нанотрубок от металлических [15] и очистки нанотрубок от примесей [16].

Последние результаты демонстрируют перспективность применения диэлектрофореза нанотрубок на пластинах, содержащих матрицу односторонних кристаллов [17, 18]. Тем не менее, данные методики предлагают высаживание одностороннего материала нанотрубок (например, сеток) или же используют топологию, усложняющие процесс интеграции нанотрубок в стандартный процесс микроэлектроники.

В данной работе предложен воспроизводимый метод сборки углеродных нанотрубок в заданных точках схемы с использованием методов традиционной литографии и диэлектрофореза. Выявлены оптимальные параметры процесса, показана возможность интеграции в одном процессе нанотрубок с различной функциональностью.

Теоретическое обоснование

Метод диэлектрофореза является мощным инструментом манипулирования и объединения малых объектов в предопределенных точках шаблона при взаимодействии внешнего электрического поля и индуцированного дипольного момента [19].

При размещении поляризуемого объекта в электрическом поле в объекте индуцируется дипольный момент. Если электрическое поле неоднородно, то напряженность электрического поля и, следовательно, сила, действующая на каждую из сторон поляризованной частицы, будут различны. При этом частица начинает двигаться в соответствующей окружающей ее среде. В зависимости от степени поляризуемости частицы и окружающей среды сила может двигать частицу к областям с высоким или

низким значением потенциала. Так, в случае размещения поляризуемого нанообъекта (например, нанотрубки) над системой из двух параллельно расположенных проводящих электродов, к которым подведена разность потенциалов, нанообъект будет ориентирован вдоль поля и начнет двигаться в перпендикулярном направлении к плоскости электродов в соответствии с направлением градиента электрического поля (рис. 1, см. вторую сторону обложки). В случае переменного электрического поля вектор действия силы и, следовательно, направление движения сохраняются, так как при изменении электрического поля также изменяется и дипольный момент.

Сила, действующая на нанотрубку, в приближении цилиндрической формы может быть записана как [20]:

$$F_{DEF} = \frac{\pi d^2 l}{8} \varepsilon_l \operatorname{Re} \left(\frac{\varepsilon_t^* - \varepsilon_l^*}{\varepsilon_l^* + (\varepsilon_t^* - \varepsilon_l^*) L} \right) \nabla E_{rms}^2;$$

$$\varepsilon_{t,l}^* = \varepsilon_{t,l} - i \frac{\sigma_{t,l}}{\omega},$$

где ε_t^* и ε_l^* — комплексные диэлектрические проницаемости нанотрубки и окружающей жидкости; ε и σ — действительная часть диэлектрической проницаемости и проводимости соответственно; L — коэффициент деполяризации; d и l — диаметр и длина нанотрубки соответственно.

Таким образом, метод электрофореза может быть использован при сборке сложных структур из углеродных нанотрубок на поверхностях различных объектов микроэлектроники, микросистемной и сенсорной техники.

Экспериментальная установка

Установка для высаживания углеродных нанотрубок методом диэлектрофореза представляет собой генератор функциональный (АНР 3122, АКТАКОМ), подключенный через усилитель к пластине, содержащей систему электродов для осуществления контакта к углеродным нанотрубкам (рис. 2, см. вторую сторону обложки). Генератор позволяет подавать на структуру переменный сигнал амплитудой до 30 В с частотой до 10 МГц. На пластине диаметром 76 мм расположены кристаллы размером $1,5 \times 1,5$ мм, содержащие четыре электрода в форме "креста". К электродам подведены контактные площадки для проведения измерений электрических свойств отдельных кристаллов. Для осуществления электрофореза по краям пластины сформированы два электрода, соединенные со второй и четвертой контактной площадкой каждого кристалла соответственно.

Углеродные нанотрубки, полученные методом дугового разряда, предварительно растворялись в 10 мл 2-пропанола в течение нескольких часов в ультразвуковой ванне. После получения коллоидной взвеси раствор заливался в чашку Петри с находящейся

в ней пластиной, и проводилась процедура диэлектрофореза в течение двух минут.

Были использованы два типа электродов с различными геометрическими параметрами. Изменяемыми параметрами диэлектрофореза являлись амплитуда и частота сигнала. Было обнаружено, что для используемого типа нанотрубок наиболее оптимальной частотой переменного сигнала является 100 кГц.

Результаты

Диэлектрофорез углеродных нанотрубок проводился при амплитуде напряжения 5 В в течение двух минут в зазоре между электродами, находящимися на расстоянии 4 мкм. Было проведено моделирование распределения электрического поля в соответствии с топологией электродов (рис. 3, а, см. вторую сторону обложки). Максимальная напряженность поля наблюдается вблизи поверхности противостоящих участков электродов и уменьшается вдвое в центральной области зазора между ними. При этом максимальная концентрация нанотрубок наблюдается на краях электродов, и нанотрубки ориентируются в соответствии с геометрией линий напряженности электрического поля (рис. 3, б, см. вторую сторону обложки). Тем не менее, канал между электродами формирует единственная нанотрубка, геометрия которой повторяет линии напряженности на краях электродов, однако претерпевает изгиб в центральной области зазора, что может свидетельствовать о большей степени влияния электрического поля по краям электродов, нежели в центральной области зазора.

При увеличении расстояния между электродами до 16 мкм для сохранения напряженности электрического поля в модели плоского конденсатора необходимо пропорционально увеличить прикладываемую разность потенциалов. При этом изменение латеральных размеров в данном приближении не должно оказывать влияния. Тем не менее, моделирование показывает, что при увеличении ширины электродов на краях пластин наблюдаются максимумы напряженности электрического поля, превышающие значения в центре пластины в 2 раза (рис. 4, а, см. вторую сторону обложки). При этом, как и в первом случае, на АСМ-изображении наблюдается соответствие между расположением нанотрубок вблизи электродов и геометрией линий напряженности электрического поля. Тем не менее, из сравнения результатов моделирования рис. 3, а и 4, а (см. вторую сторону обложки) можно видеть, что напряженность поля в центральной области зазора в случае больших электродов превышает значение напряженности поля в зазоре между электродами с зазором 4 мкм в 2,5 раза, что в итоге приводит к формированию сетки углеродных нанотрубок между электродами (рис. 4, б, см. вторую сторону обложки). При этом ориентация нанотрубок в сетке также отклоняется от линий напряженности электрического поля вблизи центральной области зазора.

Обсуждение

При высаживании углеродных нанотрубок с использованием диэлектрофореза на пластины, содержащие сотни элементов, критическим параметром является перераспределение потенциалов при постепенном формировании каналов проводимости между электродами за счет присутствия углеродных нанотрубок. В работе [21] было показано, что присутствие дополнительных сопротивлений и емкостей не влияет на процесс на высоких частотах. Благодаря разработанной топологии подводящих электродов в одном слое электрически система зазоров представляет собой параллельно соединенные емкости. Возможность высаживания углеродных нанотрубок на поверхности всех контактов, формирующей систему разводки, обуславливается высоким контактным сопротивлением, возникающим между нанотрубкой и электродом. При диэлектрофорезе принципиальная схема расположения каналов не изменяется, а происходит локальное изменение номиналов емкостей. Измеренный уровень сопротивления углеродных нанотрубок, лежащих на золотых электродах, не подвергнутых термическому отжигу, составляет сотни мегаом.

Тем не менее, при формировании канала из нанотрубок структура электрического поля в зазоре изменяется. Это подтверждается присутствием в зазоре только одной нанотрубки в случае минимальной ширины электродов (см. рис. 3). В случае большей ширины электродов (см. рис. 4) одновременно может формироваться несколько каналов проводимости на основе нанотрубок. Таким образом, изменяя форму и размер электродов, можно контролировать число высаживаемых в процессе электрофореза нанотрубок.

При высаживании углеродных нанотрубок методом диэлектрофореза диэлектрофоретическую силу могут компенсировать либо превышать силы, действующие со стороны окружающей среды: капиллярные, силы поверхностного натяжения и взаимодействие с поверхностью [22]. Таким образом, под влиянием сторонних сил геометрия нанотрубок на поверхности может отличаться от линий напряженности электрического поля, что продемонстрировано на рис. 3, а и 4, а.

Заключение

Была разработана методика диэлектрофореза углеродных нанотрубок при высаживании в матрице электродов на пластине диаметром 76 мм. Было показано, что варьирование топологии электродов и параметров диэлектрофореза позволяет формировать нанотрубки различной функциональности в одном слое.

Выражаем благодарность Крестинину А. В. (ИПХФ РАН) за предоставленный материал углеродных нанотрубок.

Работа выполнена при поддержке гранта Президента Российской Федерации для государственной поддержки молодых российских ученых МК-3132.2007.8.

Список литературы

1. Iijima S. Helical microtubules of graphitic carbon // Nature. 1991. V. 354. P. 56–58.
2. Tans S. J., Verschuieren A. R. M., Dekker C. Room-temperature transistor based on a single carbon nanotube // Nature. 1998. V. 393. P. 49–51.
3. Kong J., Franklin N. R., Zhou Ch., Chapline M. G., Peng Sh., Cho K., Dai H. Nanotube molecular wires as chemical sensors // Science. 2000. V. 287. P. 622–625.
4. Харрис П. Углеродные нанотрубы и родственные структуры. Новые материалы XXI века. М.: Техносфера. 2003. 336 с.
5. Dai H., Hafner J. H., Rinzler A. G., Colbert D. T., Smalley R. E. Nanotubes as nanoprobe in scanning probe microscopy // Nature. 1996. V. 384. N 6605. P. 147–150.
6. Бобринецкий И. И., Неволин В. К., Строганов А. А., Чаплыгин Ю. А. Модуляция проводимости пучков однослойных углеродных нанотрубок // Микроэлектроника. 2004. № 5. С. 356–361.
7. Бобринецкий И. И. Сенсорные свойства структур на основе углеродных нанотрубок // Российские нанотехнологии. 2007. Т. 2. № 5–6. С. 90–94.
8. Аксенов А. И., Бобринецкий И. И., Неволин В. К., Симунин М. М. Температурная зависимость электрического сопротивления структур на основе углеродных нанотрубок в атмосферных условиях // Датчики и системы. 2006. № 9. С. 60–64.
9. Бобринецкий И. И., Строганов А. А., Неволин В. К., Иванова О. М., Круговерцев С. А. Влияние изменения относительной влажности окружающей среды на транспортные свойства структур на основе углеродных нанотрубок // Нано- и микросистемная техника. 2007. № 10. С. 23–26.
10. Li W. Z., Xie S. S., Qian X., Chang B. H., Zou B. S., Zhou W. Y., Zhao R. A., Wang G. Large-scale synthesis of aligned carbon nanotubes // Science. 1996. V. 274. N 5293. P. 1701–1703.
11. Yamamoto K., Akita S., Nakayama Y. Orientation and purification of carbon nanotubes using ac electrophoresis // J. Phys. D: Appl. Phys. 1998. V. 31. P. L34–L36.
12. Духин С. С., Дерягин Б. В. Электрофорез. М.: Наука. 1976. 332 с.
13. Глик Б., Пастернак Дж. Молекулярная биотехнология. Принципы и применение: Пер. с англ. М.: Мир, 2002. 589 с.
14. Wang X.-B., Huang Y., Becker F. F., Gascoyne P. R. C. A unified theory of dielectrophoresis and traveling wave dielectrophoresis // J. Phys. D: Appl. Phys. 2004. V. 27. P. 1571–1574.
15. Krupke R., Hennrich F., Lohneysen H., Kappes M. M. Separation of metallic from semiconducting single-walled carbon nanotubes // Science. 2003. V. 301. P. 344–347.
16. Shim H. C., Lee H. W., Yeom S., Kwak Y. K., Lee S. S., Kim S. H. Purification of carbon nanotubes through an electric field near the arranged microelectrodes // Nanotechnology. 2007. V. 18. P. 115602–115607.
17. Monica A. H., Papadakis S. J., Osiander R., Paranjape M. Wafer-level assembly of carbon nanotube networks using dielectrophoresis // Nanotechnology. 2008. V. 19. P. 085303–085307.
18. Vijayaraghavan A., Blatt S., Weissenberger P., Oron-Carl M., Hennrich F., Gerthsen P., Hahn H., Krupke R. Ultra-large-scale directed assembly of single-walled carbon nanotube devices // Nano Lett. 2007. V. 7 N 6. P. 1556–1560.
19. Dimaki M., Bøggild P. Pielectrophoresis of carbon nanotubes using microelectrodes: a numerical study // Nanotechnology. 2004. V. 15. P. 1–8.
20. Banerjee S., White B. E., Huang L., Rego B. J., O'Brien S., Hermana I. P. Precise positioning of single-walled carbon nanotubes by ac dielectrophoresis // J. Vac. Sci. Technol. B. 2006. V. 24. N 6. P. 3173–3178.
21. Seo H.-W., Ha Ch.-S., Choi D.-G., Kim K.-S., Lee Y.-H. Controlled assembly of single SWNTs bundle using dielectrophoresis // Microelectronic Engineering. 2005. V. 81. P. 83–89.
22. Wang Y. M., Han W.-Q., Zettl A. Trapping and aligning carbon nanotubes via substrate geometry engineering // New Journal of Physics. 2004. V. 6. P. 15–18.

МАТЕРИАЛОВЕДЧЕСКИЕ И ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ МНСТ

УДК 621.22.011

В. Г. Чашухин, мл. науч. сотр.,
Институт проблем механики им. А. Ю. Ишлинского
РАН, г. Москва
E-mail: ketlk@pisem.net

СУХОЙ АДГЕЗИОННЫЙ МАТЕРИАЛ ДЛЯ СХВАТОВ В МИКРОРОБОТОТЕХНИКЕ

Описан принцип сцепления с поверхностью сухих адгезионных наноструктурированных материалов. Рассмотрены условия для обеспечения надежного прикрепления к поверхности, наиболее легкого отрыва, самоочистки подобных материалов, их геометрические и физические характеристики, необходимые для эффективного применения в робототехнике, а также модели роботов с использованием адгезионных схватов.

Ключевые слова: микроробототехника, мехатроника, адгезия, наноструктурированные материалы.

Введение

Последнее время внимание ученых привлекает использование в робототехнике захватных устройств на основе адгезионных материалов. Такой схват достаточно придавить к поверхности для обеспечения сцепления с ней. Отрыв же от поверхности может происходить постепенно, подобно развитию межфазной трещины, что обеспечивает довольно малое усилие отрыва. Прикрепление может быть обеспечено либо наличием крючков на схвате, которые цепляются за микронеровности поверхности (такой механизм исключает возможность перемещения по гладким поверхностям), либо за счет клейкой жидкости (при этом необходим механизм подачи этой жидкости на подошву). Такие механизмы используют многие насекомые.

Существует еще один способ сцепления с поверхностью — с помощью так называемого сухого адгезионного материала. Таким способом в совершенстве владеет небольшая ящерица — геккон (*Gekko gecko*). При довольно большой массе тела,

несколько сотен грамм, она имеет способность хорошо прикрепляться к поверхности [1, 2]. Геккон не имеет никаких желез на своих подошвах [3], к тому же он с одинаковой легкостью перемещается как по сухим, так и по влажным поверхностям. В связи с этим было сделано предположение, что сцепление подошвы геккона с поверхностью происходит главным образом за счет сил Ван-дер-Ваальса [3–5].

1. Моделирование взаимодействия щетинок геккона с поверхностью

Пальцы геккона были исследованы с помощью сканирующего электронного микроскопа. Обнаружено, что они покрыты рядами микроворсинок (*seta*) длиной 30...130 мкм и диаметром около 5 мкм (рис. 1, см. третью сторону обложки). Каждая микроворсинка разветвляется на 100...1000 нановорсинок (*spatulae*) диаметром 0,2...0,5 мкм, которые на кончике расширяются в виде лопаточек [3–5]. Также обнаружено, что ворсинки состоят из β -кератина, имеющего модуль Юнга, равный 4 ГПа, и являющегося несмачиваемым материалом с краевым углом смачивания водой около 160° . Сила притяжения лапы геккона к поверхности 10 Н/см^2 . В работе [3] показано, что основной вклад в притяжение ворсинок к поверхности вносит сила Ван-дер-Ваальса, которая при взаимодействии сферы радиуса R с плоской поверхностью равна [6]

$$F = \frac{A_{12}R}{6D^2},$$

где A_{12} — константа Гамакера для взаимодействия материала сферы с материалом поверхности; D — расстояние от кончика сферы до поверхности.

Сила притяжения, рассчитанная по этой формуле, находится в хорошем согласовании с реально измеренными ее значениями для различных материалов [3–5].

В работе [7] авторы рассматривают щетинку геккона как упругую балку, для которой вводят коэффициенты продольной и поперечной жесткости

$$k_x = \frac{F_x}{\Delta_x}; \quad k_y = \frac{F_y}{\Delta_y},$$

где Δ_x и Δ_y — продольное и поперечное смещение конца балки; F_x , F_y — компоненты силы, приложенной к концу балки, вдоль соответствующих направлений.

Из условия, накладываемого на силу адгезионного притяжения ($\sim 200 \text{ нН}$), приходящуюся на одну ворсинку, $F_0 \leq F_y/2$, получено ограничение на ми-

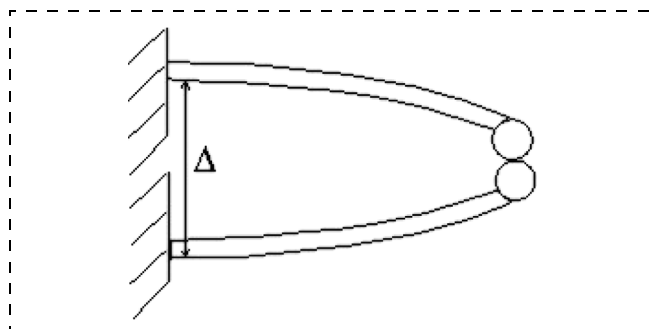


Рис. 2. Модель для расчета плотности упаковки ворсинок

нимальное расстояние между ворсинками Δ (рис. 2), которое обеспечивает их неслипание [7]:

$$\Delta \geq \frac{8F_0 l^3}{3\pi R^4 E_1},$$

где l — длина ворсинки; R — радиус закругления ее кончика; E_1 — модуль Юнга материала ворсинки ($\sim 4 \text{ ГПа}$ для кератина). При длине ворсинки $l > 9R$ получается, что $\Delta > 2R$, при этом считалось, что не происходит продольного изгиба ворсинки.

При проведении экспериментов с одной микроворсинкой геккона было выяснено, что сила отрыва от поверхности зависит от силы предварительного прижима ворсинки к поверхности, а также от угла наклона ворсинок к нормали поверхности [5]. Необходимость предварительной нагрузки обусловлена шероховатостью поверхности. Поэтому, для того чтобы обеспечить более тесный контакт микроворсинки с поверхностью, необходимо посредством предварительной нагрузки деформировать нановорсинки, которые попали на выступы микронеровностей поверхности. Сила предварительной нагрузки, отнесенная к единичной площади и необходимая для полного контакта модели микроворсинки (рис. 3) с волнистой поверхностью, которая имеет профиль,

описываемый функцией $f(x) = A \sin^2\left(\frac{\pi x}{\lambda}\right)$, равна

$$\sigma = \frac{\pi E_1 A}{2(1 - \mu_1^2)\lambda} \quad [14].$$

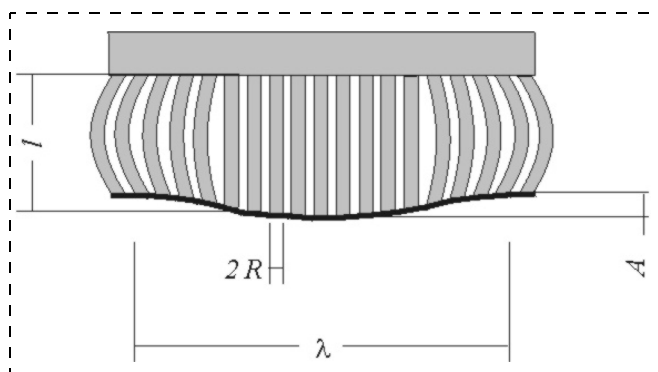


Рис. 3. Полный контакт микрощетинки с волнистой поверхностью

2. Самоочищение щетинок

Гекконы не предпринимают никаких действий, чтобы очистить свои лапы от прилипшей грязи, но тем не менее сохраняют способность бегать по стенам на протяжении нескольких месяцев между линьками. Одной из причин такого самоочищения лап геккона является существенная несмачиваемость материала щетинок — кератина. Частички грязи стекают вместе с жидкостью по поверхности лап геккона (так называемый "эффект лотоса") [8, 9]. Этот факт также препятствует слипанию щетинок. В работе [8] рассмотрен еще один механизм самоочищения щетинок. Авторы обнаружили, что при "загрязнении" ворсинок геккона частицами "грязи", средний радиус которых $R_q = 2,5$ мкм, после нескольких прикреплений к поверхности ворсинки самоочищаются. Авторы ввели коэффициент, характеризующий способность геккона прикрепляться к поверхности:

$$R(n) = \frac{F_n - F_{\text{грязн}}}{F_{\text{чист}} - F_{\text{грязн}}},$$

где F_n , $F_{\text{грязн}}$, $F_{\text{чист}}$ — силы отрыва лапы геккона от поверхности на n -м шаге, при грязной поверхности лапы и при чистой поверхности соответственно. Зависимость этого коэффициента от числа прикреплений показана на рис. 4.

Энергия взаимодействия между частицей грязи и плоской поверхностью [6]

$$W_{\text{ч.п}} = \frac{A_{\text{ч.п}} R_q}{6 D_{\text{ч.п}}}.$$

Энергия взаимодействия между частицей и нановорсинкой

$$W_q = \frac{-A_{\text{ч.н}} R_q R}{6 D_{\text{ч.н}} (R_q + R)},$$

где D — это расстояние между взаимодействующими телами; A — константы Гамакера для соответствующих материалов. Константа Гамакера для материалов, взаимодействующих через воздух, вычисляется по формуле [6]

$$A_{\text{ч.н}} \approx \sqrt{A_q A_n}.$$

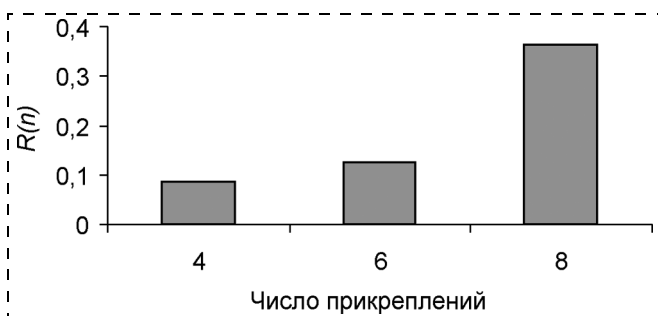


Рис. 4. Зависимость способности "загрязненного" пальца геккона прикрепляться к поверхности от числа прикреплений

Частица грязи притянется к лапе геккона, если число нановорсинок, взаимодействующих с ней, будет

$$N > \frac{W_{\text{ч.п}}}{W_{\text{ч.н}}} = \left(1 + \frac{R_q}{R}\right) \frac{A_{\text{ч.п}} D_{\text{ч.н}}}{A_{\text{ч.н}} D_{\text{ч.п}}}.$$

Маловероятно, что константы Гамакера для указанных пар материалов будут различаться более чем в 2 раза. Для оценки $D_{\text{ч.н}}$ и $D_{\text{ч.п}}$ можно принять равными, тогда при $R_q = 2,5$ мкм и $R = 0,1$ мкм число нановорсинок, необходимое для удержания частицы грязи, будет как минимум $N = 13$ [8]. Проведенные исследования показали, что в большинстве случаев число нановорсинок геккона, непосредственно контактирующих с поверхностью частицы грязи, мало, это происходит за счет большой кривизны ее поверхности по сравнению с плоской поверхностью, к которой прикрепляется лапа геккона. В то же время встречаются частицы, которые застревают между ворсинками, что происходит с ними в дальнейшем пока неясно [8].

3. Искусственные адгезивы

В настоящее время уже существуют геккоподобные материалы [10–12].

В работе [10] описывается материал из полиамида, изготовленный с помощью электронно-лучевой литографии и сухого травления в кислороде. При этом на пленке полиамида были получены волоски длиной 2 мкм и диаметром 0,5 мкм, с расстоянием между волосками 1,6 мкм. Отмечается, что при применении гибкого основания волосков эффективность прикрепления материала повышается примерно в 1000 раз по сравнению со случаем, когда основание твердое. Сила притяжения, приходящаяся на один волосок, оказалась равной ~70 нН, квадратный сантиметр такой поверхности притягивается с силой 3 Н/см², что сравнимо с аналогичным показателем для геккона (10 Н/см²).

В работе [13] предложены три различных метода изготовления геккоподобных микроструктурных материалов. Первый метод — это формование жидкого полимера, форма для которого изготавливается с помощью выдавливания углублений в воскоподобном материале иглой кантилевера атомно-силового микроскопа. Второй метод основан на использовании поликарбонатной мембраны с наноотверстиями в качестве формы для литья. С помощью такого способа изготовлены волоски высотой 5 мкм и диаметром 0,6 мкм. Этот же способ может быть применен для изготовления многоуровневых структур волосков (рис. 5). Также способ литья полимерных наноструктур рассмотрен в работе [14].

Третий способ основан на вытягивании микро-волосков из толщи полимера с помощью постоянного электрического поля (рис. 6). Тонкий слой полимера помещается между двумя плоскими электродами. Один из электродов начинает удаляться, увле-

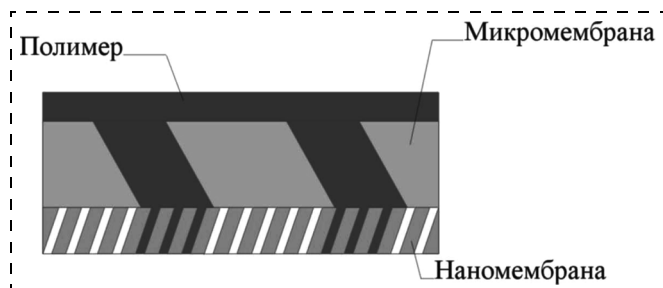


Рис. 5. Изготовление полимера с многоуровневой структурой волосков с помощью мембран с различными диаметрами пор

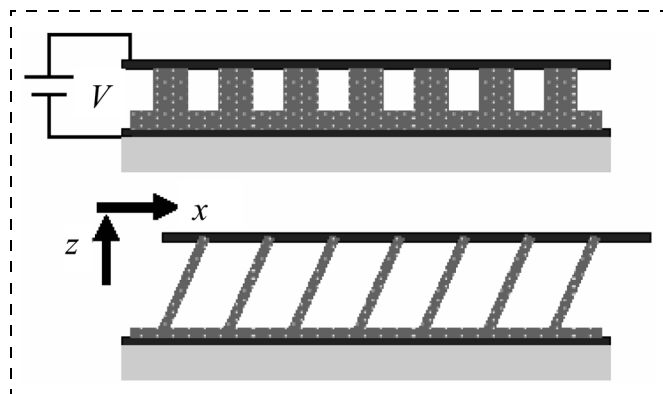


Рис. 6. Выращивание полимерных волосков с помощью электрического поля. Регулирование высоты и угла наклона волосков с помощью вертикального z и горизонтального x смещения

Сравнение адгезионных свойств различных материалов

Материал	Максимальная сила адгезии, Н/см ²
Геккон (<i>Gekko gecko</i>)	10
Древесный муравей (<i>Crematogaster</i>)	1,7
Органический кремний	0,003
Полиуретан	0,5
Полиамид	3
Многослойные нанотрубки	11,7

кая за собой часть полимера, который вытягивается в столбики по мере удаления электрода. При этом длина и угол наклона волосков определяются вертикальным и горизонтальным смещением подвижного электрода. В работе [15] предложен метод изготовления полимерных наноструктур с помощью лазерного пинцета.

Недавно было предложено использование многослойных нанотрубок в качестве волосков в микроструктуре сухого адгезионного материала [12]. Нанотрубки, довольно податливые поперечному изгибу, после снятия нагрузки восстанавливают прежнюю форму. Длина таких волосков достигает 5...10 мкм, диаметр 20...30 нм, плотность их расположения на основании 10^{10} ... 10^{11} волосков/см². Сила адгезии для такого материала достигает значения 11,7 Н/см² при взаимодействии с поверхностью стекла [12]. Срав-

нение сил адгезии для некоторых природных и искусственных микро/наноструктурных материалов приведено в таблице.

В то время как для полимерных волосков основной проблемой зачастую становится их слипание между собой и излом при изгибающей нагрузке, что приводит к уменьшению адгезии, для многослойных нанотрубок более существенной стала проблема надежности их прикрепления к основанию (после нескольких прикреплений к поверхности часть нанотрубок остается на ней).

4. Применение сухих адгезивов в робототехнике

В работах [16, 17] рассмотрены несколько конструкций роботов, в схватах которых использован геккоподобный материал (рис. 7, см. третью сторону обложки). Авторы отмечают три основных требования, предъявляемых к роботам, имеющим такие схваты [17].

1. Максимизация площади соприкосновения схвата с поверхностью.
2. Обеспечение предварительного прижима к поверхности для надежного прикрепления робота.
3. Использование механизма для постепенного отрыва схвата от поверхности.

Предварительное прижимание схвата к поверхности осуществляет так называемый "хвост" — это упругая пластина, которая одним концом опирается на поверхность, а ее второй конец прикреплен к роботу, возникающий при этом момент обеспечивает нужное прижимное усилие. Постепенный отрыв схвата в случае гусеничного робота происходит за счет момента, создаваемого задним колесом, а в шагающих моделях — механизмом, показанным на рис. 8 (см. третью сторону обложки).

В Лаборатории робототехники и мехатроники Института проблем механики РАН создан миниатюрный внутритрубный робот с электромагнитным приводом [18, 19]. Фотография робота и его схематическое изображение представлены на рис. 9.

Основные составляющие его конструкции — корпус и шток, который совершает периодические движения относительно корпуса. Внутри корпуса расположен соленоид, способный втягивать шток

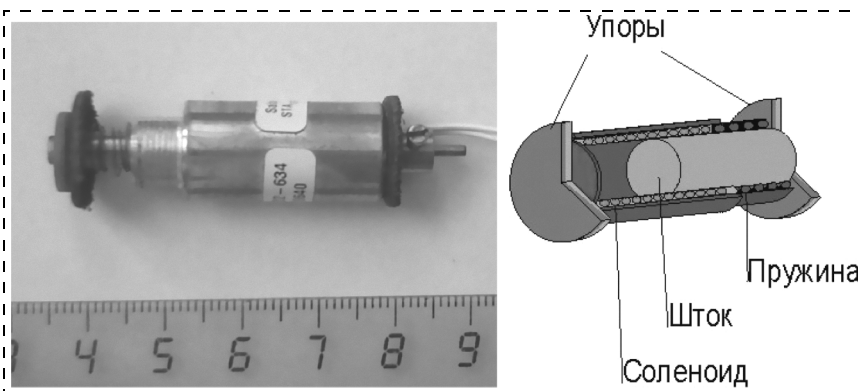


Рис. 9. Миниатюрный внутритрубный робот

при подаче напряжения на контакты соленоида. На шток надета пружина, которая стремится вытолкнуть его из корпуса. Шток и корпус снабжены упорами, посредством которых робот контактирует с поверхностью трубы. Упоры сконструированы так, что при движении робота вперед (в желаемом направлении), трение о поверхность трубы слабее, чем при движении в обратном направлении.

Движение робота осуществляется повторением циклов, каждый из которых состоит из двух этапов: вытягивание штока и его выталкивание. В первой фазе движения на контакты соленоида подается напряжение. Соленоид стремится втянуть шток, но так как трение упора штока в обратном направлении больше, чем трение упора корпуса, то корпус подтягивается к штоку. При этом пружина сжимается. Во второй фазе с соленоида снимается напряжение и происходит выталкивание штока за счет высвобождения упругой энергии пружины. При этом штоку легче двигаться вперед, чем корпусу назад, вследствие разности в коэффициентах трения упоров штока и корпуса. После второй фазы движения робот приходит в исходное положение, сдвинутое на длину рабочего хода штока по направлению движения.

Уравнение движения центра масс робота имеет вид [20]

$$m\ddot{x}_c = -mg \sin \beta - (F_{\text{тр}}^1 + F_{\text{тр}}^2) - D_1 \dot{x}_1 - D_2 \dot{x}_2,$$

где β — угол наклона трубы к горизонту, x_i ($i = 1, 2$) — координаты штока и корпуса соответственно, отсчитываемые вдоль оси трубы (абсолютные смещения штока и корпуса); m — масса робота; g — ускорение силы тяжести. Точки отсчета координат x_1 и x_2 выбраны так, что при $x_1 = x_2$ пружина не деформирована, а в начальный момент времени $x_i = 0$, $F_{\text{тр}i}$ — силы сухого трения и $D_i \dot{x}_i$ (D_i — коэффициент сопротивления среды) — силы сопротивления среды.

Силой, направленной вдоль положительного направления оси x , будет член, включающий силы сухого трения. На них накладывается ограничение

$$-\mu^+(N_1 + N_2) \leq -(F_{\text{тр}1} + F_{\text{тр}2}) \leq \mu^-(N_1 + N_2),$$

где N_i — силы реакции опоры.

Таким образом, чем больше отношение μ^-/μ^+ , т. е. чем более анизотропно трение, тем большее тяговое усилие может иметь робот по отношению к силе торможения, вызванной тем же сухим трением. Увеличить анизотропность трения и силу давления на стенки трубы можно за счет подбора материала упоров.

Одним из решений этой задачи является применение наноструктурированных адгезионных материалов на площадках соприкосновения робота с поверхностью. Пример такого материала показан на рис. 10.

При соприкосновении ворсинки материала попадают в микронеровности поверхности, таким образом увеличивая площадь его контакта с поверхностью.

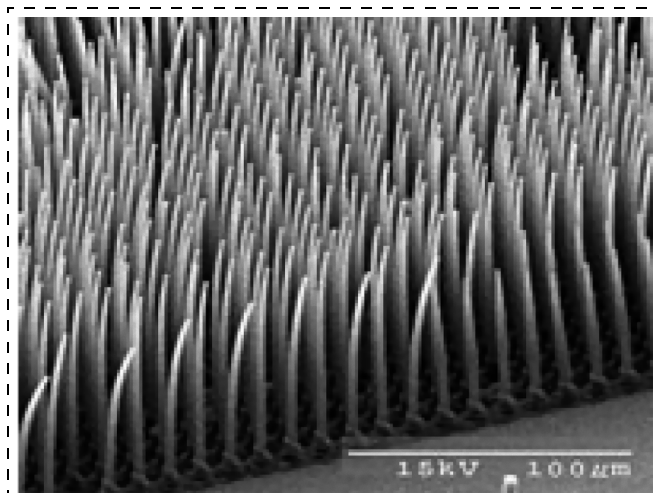


Рис. 10. Адгезионный ворсистый материал

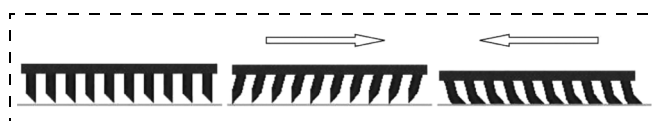


Рис. 11. Материал с повышенной анизотропией по трению. Слева направо: ненагруженный материал, скольжение вправо с меньшим трением, скольжение влево с большим трением

Диаметр ворсинок порядка долей микрометра, плотность их упаковки $10^{10} \dots 10^{11}$ ворсинок на 1 см^2 [12]. Расстояние между кончиками ворсинок и поверхностью имеет порядок межмолекулярного расстояния, и ворсинки испытывают на себе межмолекулярное притяжение, сила которого существенна для такого огромного числа ворсинок на единицу площади.

Схема действия материала с повышенной анизотропией по трению показана на рис. 11 [21]. Во время скольжения вперед ворсинки изгибаются таким образом, что площадь соприкосновения с поверхностью минимальна. При движении в обратном направлении с поверхностью будут контактировать волоски, находящиеся на срезе ворсинок, возникнет адгезионное притяжение, следовательно, увеличится сила трения скольжения.

Заключение

Таким образом, видно, что роботы со схватами на основе сухого адгезионного материала имеют ряд преимуществ перед своими аналогами:

- такой хват не требует затрат энергии после прикрепления к поверхности;
- конструкцию схвата можно проектировать практически под любой рельеф поверхности;
- ему не страшно наличие трещин как пневматическому схвату, при сильно неровных поверхностях его можно снабдить "пальцами", подобно геккону, которые будут компенсировать макронеровности поверхности;
- в связи с меньшими энергозатратами повышается мобильность и автономность робота; подобный

робот способен перемещаться по произвольно ориентированным в пространстве поверхностям, а также переходить с поверхности на поверхность;

- простота конструкции способствует минимизации его размеров и делает микроробототехнику основным полем применения роботов со схватами на основе сухих адгезионных материалов.

Работа поддержана Российским фондом фундаментальных исследований (грант № 8-01-00365).

Список литературы

1. Irschick D. J., Austin C., Petren K., Fisher R. N., Losos J. B., Ellers O. A comparative analysis of clinging ability among pad-bearing lizards // Biological Journal of the Linnean Society. 1996. № 59. P. 21–35.
2. Gao H., Yao H. Shape insensitive optimal adhesion of nanoscale fibrillar structures // PNAS. 2004. V. 101. № 21. P. 7851–7856.
3. Autumn K., Sitti M., Liang Y. A., Peattie A. M., Hansen W. R., Sponberg S., Kenny T. W., Fearing R., Israelachvili J. N., Full R. J. Evidence for van der Waals adhesion in gecko setae // PNAS. 2002. V. 99. № 19. P. 12252–12256.
4. Autumn K., Peattie A. M. Mechanisms of adhesion in geckos // Integr. Comp. Biol. 2002. № 42. P. 1081–1090.
5. Autumn K., Liang Y., Hsieh T. et al. Adhesive force of a single gecko foot hair // Nature. 2000. V. 405. P. 681–685.
6. Israelachvili J. Intermolecular and surface forces. 2nd ed. // London: Academic Press, 1992.
7. Sitti M., Fearing R. S. Synthetic gecko foot-hair micro/nano-structures for future wall-climbing robots // Proceedings of the 2003 IEEE International Conference on Robotics and Automation. Taipei. Taiwan. 2003.
8. Hansen W. R., Autumn K. Evidence for self-cleaning in gecko setae // National Academy of Science. 2005. V. 102. № 2. P. 385–389.
9. Neinhuis C., Barhloft W. Characterization and distribution of water-repellent, self-cleaning plant surfaces // Ann. Bot. 1997. V. 79. P. 667–677.

10. Geim A. K., Dubonos S. V., Grigorieva I. V., Novoselov K. S., Zhukov A. A., Shapoval S. Yu. Microfabricated adhesive mimicking gecko foot-hair // Nature Materials. 2003. № 2. P. 461–463.

11. Gaurav J., Sitti S., Sitti M. Modelling and design of biomimetic adhesives inspired by gecko foot-hairs // IEEE Conference on Robotics and Biomimetics. Shenyang. China. 2004.

12. Zhao Y., Tong T., Delzeit L., Kashani A., Meyyappan M., Majumdar A. Interfacial energy and strength of multiwalled-carbon-nanotube-based dry adhesive // J. Vac. Sci. Technol. 2006 B. 24 (1). P. 1071–1073.

13. Sitti M. High aspect ratio polymer micro/nano-structure manufacturing using nanoembossing, nanomolding and directed self-assembly // IEEE/ASME Advanced mechatronics conference. Kobe. Japan. 2003.

14. Jagota A., Bennison S. J. Mechanics of Adhesion Through a Fibrillar Microstructure // Integrative and Comparative Biology. 2002. N 42. P. 1140–1145.

15. Castellino K., Srinath S., Sitti M. Manufacturing of two and three-dimensional micro/nano structures by integrating optical tweezers with chemical assembly // Robotica. July 2005. V. 23. Issue 4. P. 435–439.

16. Unver O., Murphy M., Sitti M. Geckobot and Waalbot: Small-Scale Wall Climbing Robots // AIAA 5th Aviation, Technology, Integration, and Operations Conference (ATIO). Arlington. Virginia. 2005.

17. Menon C., Murphy M., Shah G., Sitti M., Angrilli F. WaalBots for Space Applications // 55th IAC Conference, Vancouver, 2004.

18. Gradetsky V., Solovtsov V., Kniazkov M., Rizzotto G., Amato P. Modular design of electro-magnetic mechatronic microrobots // Proc. of the 6-th International Conference CLAWAR 2003, Catania, Italy. 2003. P. 651–658.

19. Rizzotto G., Velkenko M., Amato P., Gradetsky V., Baskirov S., Knyazkov M., Solovtsov V. In-Pipe Microrobot with Inertial Mood of Motion // Climbing and Walking Robots, Springer Berlin Heidelberg, 2005. P. 1041–1051.

20. Чапучин В. Г. Моделирование динамики и определение управляющих параметров внутритрубного миниробота // Теория и системы управления. 2008. № 5. С. 142–147.

21. Чапучин В. Г. Исследование устройств сцепления мобильных роботов с поверхностью, имеющих адгезионные материалы на контактных площадках // Препринт № 861. ИПМех РАН.

УДК 621.791.3

В. Н. Штенников, канд. техн. наук, зам нач. управления,
ФГУП УЭМЗ, г. Екатеринбург
E-mail: shennikov@uemz.ru

ПРОБЛЕМЫ МИНИМИЗАЦИИ ВРЕМЕНИ КОНТАКТНОЙ И ЛАЗЕРНОЙ ПАЙКИ

Для контактной и лазерной пайки характерно минимальное время разогрева и максимальный перепад температуры по сравнению с другими методами пайки.

В статье приведены рекомендации по минимальной продолжительности контактной и лазерной пайки.

Ключевые слова: прибор, сборка, микроэлектроника, МСТ, пайка, качество.

В настоящее время в России и за рубежом проводятся работы по применению датчиков различных физических величин на базе микросистемной техники (МСТ). Внедрение МСТ и развитие технологии поверхностного монтажа открывает перспективы дальнейшего повышения функциональности, миниатюризации и снижения цены приборов.

ГОСТ 17325–79 определяет несколько десятков видов пайки в зависимости от температуры пайки, применяемого припоя или флюса, источника нагрева, среды, в которой выполняется пайка, применяемого инструмента и т. д. Эти виды не включают контактную пайку. Ю. П. Шлыков исследовал вопросы контактного теплообмена, что применительно к пайке принципиально отличает этот вид нагрева от воздействия ИК излучения, конвекционного теплообмена [1]. Более того, в проспектах фирмы "Эрса",

а также в других источниках применяется термин именно "контактная пайка" в отличие от пайки паяльником газовым, ультразвуковым и т. д., низко-температурной пайки ИК, волной припоя, конвекционной и т. д. [2].

Контактная пайка — наиболее универсальный вид монтажа. Температура контактной пайки зависит не только от температуры паяльного инструмента, но и от конструктивных параметров как паяльного инструмента, так и паяного соединения [3]. Температура контактной пайки всегда ниже температуры холостого хода паяльного стержня.

При ИК и лазерной пайке температура нагрева паяных соединений кроме теплопроводности и теплоемкости соединяемых деталей зависит и от коэффициента поглощения поверхности.

По сравнению с другими методами лазерная пайка имеет и ряд существенных преимуществ:

- во время пайки печатная плата и корпуса элементов практически не нагреваются, что позволяет монтировать микрокомпоненты, чувствительные к тепловым воздействиям;
- метод позволяет выполнять паяные соединения в модулях с высокой плотностью монтажа и малым шагом выводов без образования перемычек и шариков припоя;
- установки лазерной пайки могут быть полностью автоматизированы;
- при использовании лазерной пайки нет необходимости в предварительном подогреве многослойной печатной платы, что обычно необходимо делать при пайке волной припоя, в паровой фазе для предотвращения расслоения платы;
- для приклеивания электронных компонентов не требуется использовать специальные высокотемпературные клеящие композиции;
- имеется возможность проводить селективную сборку, при которой отдельные элементы могут устанавливаться позднее.

Отмечая влияние ряда факторов, определяющих качество паяных соединений (время пайки, состояние соединяемых поверхностей, используемый флюс, состав припоя, зазор между деталями), необходимо отметить, что основное значение имеет температура пайки [4–7].

Контактную и лазерную пайку объединяет одна особенность — возможность выполнения паяного соединения за относительно короткое время.

Оценим возможности увеличения производительности одиночной контактной и лазерной пайки.

Энергия при воздействии лазерного излучения выделяется в слое толщиной около $10^{-6} \dots 10^{-5}$ см [7]. Температура более глубоких областей облучаемой поверхности растет за счет теплопроводности.

Определить интенсивность теплового потока излучения можно, зная коэффициент поглощения поверхности паяного соединения. В дальнейшем рассчитывают величину нагрева различных участков паяного соединения, решая соответствующую зада-

чу для полуограниченного тела с граничными условиями 2-го рода [3, 8, 9].

В частности, если интенсивность теплового потока на поверхности паяного соединения пропорциональна времени воздействия $\tau^{-1/2}$, что характерно в первую очередь для контактной пайки, то температуру пайки в зависимости от времени воздействия и удаления от поверхности, а также градиент температуры на поверхности, можно рассчитать по уравнениям [3]:

$$t_{\text{п}}(x, \tau_{\text{п}}) = t_{\text{п}}(x=0) \left\{ 1 - \Phi \left(\frac{x}{2\sqrt{a\tau_{\text{п}}}} \right) \right\}, \quad (1)$$

$$\frac{\partial t}{\partial x} = \frac{t_{\text{п}}(x=0)}{\sqrt{\pi a \tau_{\text{п}}}}, \quad (2)$$

где $\tau_{\text{п}}$ — время пайки, с; $t_{\text{п}}$ — температура пайки, °С.

В случае постоянной интенсивности теплового потока на поверхности паяного соединения температуру на его поверхности можно рассчитать по уравнению

$$t_x = \frac{2\sqrt{\tau_{\text{п}}}}{\sqrt{\pi \lambda \rho c}} F, \quad (3)$$

где $\sqrt{\pi \lambda \rho c}$ — коэффициент теплоусвоения материала паяного соединения, $\text{Дж} \cdot \text{с}^{-1/2} \cdot \text{м}^{-2} \cdot ^\circ\text{С}^{-1}$; λ — коэффициент теплопроводности, $\text{Вт} \cdot \text{м}^{-1} \cdot ^\circ\text{С}^{-1}$; ρ — плотность, $\text{кг} \cdot \text{м}^{-3}$; c — удельная теплоемкость, $\text{Дж} \cdot \text{кг}^{-1} \cdot ^\circ\text{С}^{-1}$; F — интенсивность теплового потока, $\text{Вт} \cdot \text{м}^{-2}$.

Градиент температуры на поверхности паяного соединения в этом случае можно определить по выражению [8]:

$$\frac{\partial t}{\partial x} = \Phi \left(\frac{x}{2\sqrt{a\tau_{\text{п}}}} \right) \frac{F}{\lambda}, \quad (4)$$

где a — коэффициент температуропроводности материала паяного соединения, $\text{м}^2 \cdot \text{с}^{-1}$; $\Phi(u) =$

$$= \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^u e^{-\xi^2} d\xi \text{ — интеграл вероятности.}$$

Оценим минимально допустимое время контактной и лазерной пайки, если известно, что на поверхности паяного соединения задан тепловой поток с интенсивностью, пропорциональной $\tau^{-1/2}$.

Данные из ОСТ 4Г0.033—200 "Припои и флюсы для пайки" показывают, что плотность и удельная теплоемкость меди мало отличаются от плотности и удельной теплоемкости припоев для пайки ЭРИ на печатные платы. Поэтому для проведения оценки вполне допустимо считать, что коэффициенты температуропроводности меди и упомянутых припоев различаются только за счет теплопроводности (примерно в 8 раз). Подставляя значение коэффициента температуропроводности для медного вывода и для

различных припоев в соотношение (2), оценим перепад температуры по глубине metallизированного отверстия при толщине печатной платы 1,5 мм с выводом и без вывода, при избыточной температуре контактной пайки $t_{\text{п}} = 230$ °С согласно отраслевому стандарту ОСТ В95 2302—82:

- (14...20) °С для вывода при времени пайки (2... 1) с;
- (40...57) °С без вывода, но с припоем при времени пайки (2...1) с.

Таким образом, перепад температуры по глубине metallизированного отверстия может составлять несколько десятков градусов, что соответствует экспериментальным данным из работы [10] — около 50 °С при нагреве metallизированного отверстия без вывода и расчетным данным из работы [11] — (35...30) °С по выводу. Расхождения экспериментальных данных с расчетными объясняются, во-первых, принятыми допущениями и, во-вторых, недоступностью измерения температуры в центре metallизированного отверстия из-за наличия в нем вывода, выступающего согласно конструкторской документации на 1,5 мм над поверхностью платы. В последнем случае расчетное значение длины вывода приближается к 3 мм, что объясняет полученный результат.

Используя зависимость (2), можно также заключить, что при длительности лазерного излучения 0,02 с и температуре на поверхности вывода микросхемы, соответствующей максимально допустимой (265 °С), разогрев нижней поверхности вывода хотя бы до минимально допустимой температуры пайки (230 °С) становится проблематичным.

Учитывая, что параметры оборудования и паяных соединений могут отличаться друг от друга, а кроме толщины вывода микросхемы необходимо учитывать зазор между выводом и контактной площадкой, заполненный пастой, следует с большой осторожностью подходить к вопросу обеспечения гарантированной надежности паяных соединений в производственных условиях при времени пайки 0,02 с [12].

На предприятии экспериментальные работы по лазерной пайке выводов микросхем проводили непрерывным движением луча постоянной мощности по нагретому припою с нанесенным флюсом ФКСп [13]. Расчетное время пайки составляло около 0,5 с. Вследствие отсутствия прямого воздействия лазерного излучения на корпуса микросхем они при пайке выводов нагревались до температуры не выше 113 °С.

Прочность паяных соединений, полученных на автомате лазерной пайки для печатных плат с горячим покрытием ПОСб1 составила: 11 Н на вывод для соединений скелетно-заливной формы и 6,60 Н на

вывод для соединений скелетной формы. Среднее значение механической прочности на отрыв составило 8,80 Н на вывод для одиночных контактных площадок.

Различий по шлифам паяных соединений от пайки вручную, полуавтоматом или лазером не обнаружено. Разрыв паяного соединения для всех методов пайки происходил по границе: вывод—припой.

Не исключая возможности применения лазерной пайки при планарном и поверхностном монтаже, следует обратить внимание на перспективы применения лазерной пайки при смешанном монтаже на финишной операции монтажа микроминиатюрных приборов различного назначения.

Таким образом, развитие научного направления по обеспечению требуемых режимов пайки электронных приборов позволяет существенно повысить эффективность обработки соответствующих технологических режимов сборки и повысить достоверность полученных результатов [14].

Список литературы

1. Шлык Ю. П. Исследование контактного теплообмена. Автореферат дис. на соиск. учен. степени д-ра техн. наук. Л., 1965. 17 с. (ЦКТИ).
2. Каталог фирмы Ersa, 1995, 18 с.
3. Штенников В. Н., Байдаков В. Г. Наука и производство. Повышение качества приборов автоматики // Компоненты и технологии. 2004. № 6. С. 192—194.
4. Нинг-Ченг Ли. Технология пайки оплавлением, поиск и устранение дефектов: поверхностный монтаж, BGA, CSP и flip chip технологии. М.: Издат. дом "Технологии", 2006. 392 с.
5. Джуд М., Бриндли К. Пайка при сборке электронных модулей. М.: Издат. дом "Технологии", 2006. 416 с.
6. Kordas K., Pap A. E., Toth G. and ets. Laser Soldering of Flip-Chips // Optics and Lasers in Engineering. 2006. № 2.
7. Аллас А. А. Лазерная пайка в производстве радиоэлектронной аппаратуры / Под ред. В. П. Вейко и В. С. Новосадова. СПб.: СПбГУ ИТМО, 2007. 134 с.
8. Пехович А. И., Жидких В. М. Расчеты теплового режима твердых тел. Л.: Энергия, 1976. 350 с.
9. Штенников В. Н., Байдаков В. Г. Повышение надежности приборов и производительности оборудования для контактной пайки // Компоненты и технологии для публикации. 2004. № 7. С. 192—193.
10. Отчет УЭМЗ № 103/514. Исследование динамических качеств паяльников / Исп. Ю. Н. Кузьмин, Г. М. Перевозчиков, В. Я. Пришвицын, Г. Ш. Нуртдинов, 1975. 28 с.
11. Отчет УЭМЗ № 173/514. Анализ режимов монтажа матриц 2ТС 613Б в прибор 82 на соответствие НТД на матрицу / Исп. В. Н. Штенников, В. В. Годличев, В. М. Федотовских, С. М. Ушаков, 1979. 26 с.
12. Ланин В. Лазерная пайка при сборке электронных модулей // Технологии в электронной промышленности. 2007. № 6. С. 40—44.
13. Протокол УЭМЗ № 1528/ПН. Проработка вопроса лазерной пайки выводов микросхем типа 401.14 на МПП с ОКП / Исп. В. Н. Штенников, В. М. Федотовских, 1984. 5 с.
14. Великанов В. Б., Денисов Ю. В. Основы научного сопровождения производства прецизионных приборов // Новые промышленные технологии. 2008. № 1. С. 6—13.

А. А. Агасиев, д-р физ.-мат. наук, проф.,
Э. М. Магеррамов, канд. физ.-мат. наук, доц.,
Дж. Г. Джаббаров, канд. физ.-мат. наук, доц.,
М. З. Мамедов, канд. физ.-мат. наук, науч. сотр.,
 Бакинский государственный университет
 E-mail: agasiev@rambler.ru

ТЕПЛОВОЕ РАСШИРЕНИЕ ТВЕРДОГО ТЕЛА

Показано, что увеличение длины стержня из твердого материала с повышением температуры (при малых изменениях температуры) пропорционально изменению расстояния между атомами. Гармонические колебания не приводят к изменению длины стержня. Однако сила, возвращающая атомы к положению равновесия, приводит к появлению некоторого ангармонизма, которое описывается кубическим членом в выражении потенциальной энергии.

Ключевые слова: длина, стержень, слабый, межатомное расстояние, гармонический характер, кубический член.

Рассмотрим изменение длины стержня L из твердого материала, которое увеличивается с повышением температуры. Обозначим увеличение длины при повышении на 1 К через $(\Delta L)_1$. Тогда коэффициент линейного теплового расширения можно определить как

$$\tau = (\Delta L)_1 / L, \quad (1)$$

который, в свою очередь, возрастает с температурой. Если рассматривать простые твердые вещества при комнатной температуре, то изменение коэффициента τ можно считать малым по сравнению с его значением в интервале 100 К, а увеличение длины пропорционально повышению температуры ΔT , т. е. $\Delta L / L = \tau \Delta T$ при условии $\Delta L \ll L$. Для того чтобы оценить приближенно значение коэффициента τ , предположим, что ΔL пропорционально ΔT даже при незначительных изменениях длины. Пусть мы сообщаем стержню такую энергию, при которой на каждый атом вещества стержня приходится энергия, равная энергии связи атома E (энергия, необходимая для разъединения вещества на отдельные атомы). Естественно, при такой операции весь материал разрушится. Примем качественно, что такое разрушение происходит, когда межатомные расстояния увеличиваются в 2 раза, т. е. длина стержня удваивается ($\Delta L = L$). Далее, полагаем, что линейная зависимость ΔL от ΔT сохраняется вплоть до температур, при которых на каждый атом приходится энергия E , а приращение температуры ΔT есть мера энергии, сообщаемой каждому атому. Например, повышение температуры на 1 К соответствует возрастанию энергии каждого атома приблизительно на величину, равную постоянной Больцмана k , т. е. примерно на

10^{-4} эВ. Согласно теореме о равномерном распределении энергии по степеням свободы на трехмерный осциллятор приходится энергия $3 kT$. Но при исследовании линейного расширения стержня в нашем случае нас интересует колебательное движение только в одном направлении. Если имеет место линейная зависимость ΔL от ΔT , то удлинение (ΔL) при повышении температуры на 1 К должно быть меньше, чем удлинение $\Delta L = L$ при получении атомом энергии, примерно в k/E раз. Таким образом,

$$\tau = \frac{(\Delta L)_1}{L} \approx \frac{k}{E} \approx \frac{10^{-4}}{E}, \quad (2)$$

где E — энергия связи в электронвольтах для твердого состояния вещества при комнатной температуре.

В таблице приведены значения коэффициента линейного теплового расширения τ_p — рассчитанные, τ_ε — экспериментально измеренные, а также значения энергии связи E и дебаевского параметра θ некоторых веществ [1, 2].

Как видно из таблицы, большинство простых твердых веществ обладают коэффициентами линейного теплового расширения порядка 10^{-5} , которое легко объясняется исходя из того, что повышение температуры на 1 К соответствует сообщению каждому атому энергии, составляющей 10^{-4} — 10^{-5} энергии связи.

Выражение (2) получено на основании того, что удлинение пропорционально повышению температуры. Покажем, что при малых изменениях температуры это предположение действительно выполняется.

Рассмотрим два соседних атома, колеблющихся относительно положений их равновесия, которые разделены расстоянием d . Исследуем поведение двух соседних атомов стержня, материал которого характеризуется межатомным расстоянием d . В каждый момент времени расстояние между атомами составляет $(d + x)$, где x — отклонение от равновесного положения. До тех пор, пока потенциальную энергию U_x можно считать квадратичной функцией

Значения коэффициента линейного теплового расширения, энергии связи и дебаевского параметра [1,2]

Вещество	$\tau_p \cdot 10^5$	$\tau_\varepsilon \cdot 10^5$	E , эВ	θ , К
Na	3,9	6,9	1,1	158
Li	2,7	4,5	1,6	344
Al	1,3	2,3	3,4	428
C	0,58	0,1	7,4	2230
Fe	1,0	1,2	4,3	470
Ni	1,0	1,3	4,3	450
Si	0,94	0,25	4,6	645
Cu	1,24	1,6	3,5	450
Pb	2,2	2,9	2,0	105

$U(x) = ax^2$, колебания являются гармоническими и среднее значение x равно нулю независимо от энергии колебания.

Гармонические колебания характеризуются симметрией движения относительно центра колебаний, поэтому они не приводят к изменению длины стержня. Но, поскольку возвращающая атомы к равновесию сила возрастает при $x < 0$ и уменьшается при $x > 0$, можно ожидать появления ангармонизма. По сравнению с гармоническим движением сопротивление растяжению при больших расстояниях между атомами убывает, а сопротивление сжатию при уменьшении расстояния между ними увеличивается. Тогда в первом приближении это можно описать кубическим членом в выражении для потенциальной энергии $U(x)$:

$$U = ax^2 - bx^3, \quad (3)$$

где $a, b > 0$.

При колебательном движении кинетическая энергия в крайних точках $x_{\pm}$ — траектории x обращается в нуль. Следовательно, при $x = x_{\pm}$ можно приравнять $U(x)$ полной энергии. Согласно теореме о равномерном распределении энергии по степеням свободы, пока ангармонические поправки относительно малы, тепловая энергия гармонического осциллятора равна kT . Тогда можно написать:

$$kT = ax_{\pm}^2 - bx_{\pm}^3. \quad (4)$$

В случае, когда $b = 0$, имеем

$$x_{\pm} = \pm \left(\frac{kT}{a} \right)^{1/2}.$$

При комнатной температуре кубический член в потенциальной энергии мал по сравнению с квадратичным, так что мы можем найти $x_{\pm}$ при $b \neq 0$ путем подстановки во второй член первой части выражения (4) значений $x_{\pm}$, соответствующих $b = 0$:

$$x_{\pm}^2 = \frac{kT}{a} \left(1 \pm \frac{b}{a} \sqrt{\frac{kT}{a}} \right),$$

где корень берется со знаком плюс. Тогда экстремальные точки x_+ и x_- определим, считая второй член в скобках малым по сравнению с единицей, т. е.

$$x_+ = + \sqrt{\frac{kT}{a}} + \frac{b}{2a} \frac{kT}{a}; \quad x_- = - \sqrt{\frac{kT}{a}} + \frac{b}{2a} \frac{kT}{a}.$$

Следовательно, два экстремальных значения отклонения от равновесия равны по абсолютной величине и противоположны по знаку. Оба они сдвинуты в положительном направлении на величину

$$\delta = (b/2a^2)kT. \quad (5)$$

Значит, среднее значение смещения $\bar{x}$ не равно нулю, а близко к δ . Оно не равно в точности δ , поскольку усреднения при ангармонических колебаниях довольно сложны, но в пределах нашего рассмотрения можно считать $\bar{x} \approx \delta$.

При исследовании поведения функции $U(x)$ при $x = d$ можно получить оценки для параметров a и b . В этом случае приближение (3) уже несправедливо и в выражении для потенциальной энергии необходимо учитывать члены высших порядков по x . Мы полагаем, что при $x \approx d$ величина $U(x)$ порядка энергии связи. И, естественно, можно предположить, что члены разложения (3) имеют порядок величины E . Тогда можно считать $a \sim E/d^2$; $b \sim E/d^2$ и согласно (5) для относительного удлинения получим выражение $\delta/d \approx (1/2)(kT/E)$. Так как предполагаем, что длина стержня увеличивается пропорционально расстоянию между атомами, для коэффициента теплового расширения получим:

$$\tau \approx \frac{1}{2} \frac{k}{E} \approx 0,43 \frac{10^{-4}}{E}, \quad (6)$$

который почти совпадает с формулой (2). Иногда использование выражения (2) приводит к лучшему согласию. Исключение составляют алмаз и кремний. Это связано с тем, что температура Дебая этих веществ значительно превышает комнатную температуру. Последнее означает, что значительная часть атомных колебаний при комнатной температуре не возбуждена и предположение о том, что на каждое одномерное колебание приходится энергия kT , не справедливо. Для алмаза коэффициент τ имеет значение $0,51 \cdot 10^{-5}$ при 1400 К, а для кремния — $0,45 \cdot 10^{-5}$ при 1200 К. Следовательно, при высоких температурах формула (6) согласуется с экспериментом лучше.

Увеличение длины стержня из твердого материала с повышением температуры действительно имеет место и связано с изменением расстояния между атомами.

Список литературы

1. Киттель Ч. Введение в физику твердого тела. М.: Наука, 1978.
2. Weiskopf V. F., Bernstein H. Amer. // J. Phys. 1985. V. 53. № 12.

УДК 53.082.6

Н. А. Дюжев, канд. физ.-мат. наук, нач. отдела,
А. Н. Поправкин, инженер,
И. Г. Шкуропат, нач. лаб.,

А. Н. Шокин,

А. Ф. Попков, канд. физ.-мат. наук, проф.

E-mail: popravkin.alexey@gramekom.ru

Государственный научно-исследовательский
институт физических проблем им. Ф. В. Лукина
(НИИФП), г. Зеленоград

УНИВЕРСАЛЬНЫЙ ТЕРМОЧУВСТВИТЕЛЬНЫЙ ЭЛЕМЕНТ ДЛЯ ДАТЧИКОВ ГАЗОВОГО ПОТОКА

Рассмотрены вопросы создания, разработки и практического применения термочувствительных элементов резистивного типа на основе кремниевой технологии применительно к области измерения скорости потока и расхода газов.

Ключевые слова: микротермоанемометр, расходомерия, кремниевая технология, датчик расхода газа.

В настоящее время существует большое число областей промышленности и техники, в которых необходимо проводить контроль расхода той или иной газовой смеси. Некоторыми примерами таких областей могут служить сферы учета расхода бытового газа, газовая хроматография, различные производственные процессы, проходящие в среде инертных газов (например, азоте), и др. Также датчик массового расхода газа является неотъемлемой частью автомобильных двигателей внутреннего сгорания инжекторного типа.

Анализ рынка расходомеров показывает, что большую часть продаваемых на данный момент датчиков расхода составляют сложные и дорогостоящие приборы роторного (механического) и ультразвукового типа. Высокая стоимость и необходимость частой проверки данных устройств ограничивает их массовое применение в неспециализированных областях.

В связи с этим особенно перспективной является разработка универсального чувствительного элемента (сенсора) для датчиков потока газов на базе технологии многослойных термокомпенсированных диэлектрических мембран и платиновых резисторов.

Создание датчика на основе кремниевой технологии позволяет добиться низкой себестоимости, простоты технологического процесса изготовления и высоких измерительных характеристик датчика, что обеспечивает возможность его применения в сферах, где расходомерия до этого применялась ограниченно или не применялась вообще. При этом на основе одной и той же производственной базы и технологического процесса с незначительными изменениями можно производить как массовые бытовые приборы (например, счетчики), так и специализированные высокоточные приборы для лабораторного применения.

Анализ мировых аналогов датчиков расхода на основе именно кремниевой технологии показывает, что основными поставщиками в данной сфере являются компании Bosch и Honeywell, продукцию которых условно можно разделить на две категории: сенсоры со встроенным усилителем и сенсоры без усиления. Первая категория характеризуется высокой стоимостью, приближающейся к стоимости ультразвуковых приборов, во вторую категорию входят изделия, в большинстве своем отличающиеся низким классом точности и позиционируемые производителем как индикаторы, а не измерители. При этом поставляемая в Россию номенклатура датчиков Honeywell не закрывает все требуемые диапазоны измерения расходов.

Структура и характеристики чувствительного элемента SRV

С учетом анализа особенностей зарубежных разработок чувствительных элементов датчиков расхода газа фирмы Bosch, Honeywell и др., а также на основании собственного многолетнего опыта в ФГУП НИИФП им. Ф. В. Лукина был разработан и подготовлен к серийному производству чувствительный элемент на базе платиновых резисторов, сформированных на тонкой мембране, который позволяет менять режимы измерения расхода газа (см. ниже) и использоваться как универсальный терморезисторный элемент в датчиках газового потока различного назначения. На рис. 1 схематически показано топологическое изображение кристалла разработанного термочувствительного датчика расхода. В таблице представлены параметры платиновых резисторов.

Конструктивно-технологической основой сенсора является разработанная многослойная термокомпенсированная диэлектрическая мембрана на крем-

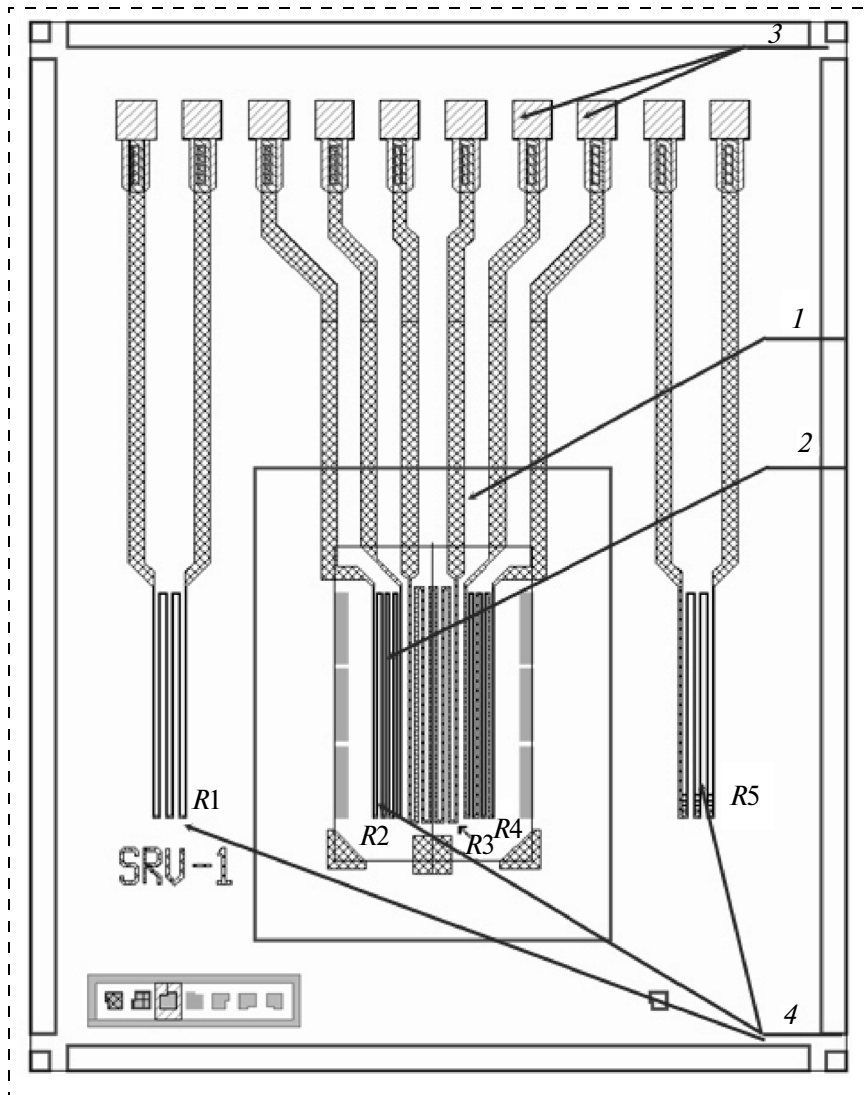


Рис. 1. Структура кристалла терморезистивного чувствительного элемента датчика расхода газа:

1 — колодец для формирования мембраны (размер колодца 1356×1800 мкм); 2 — диэлектрическая мембрана (размер мембраны 756×1200 мкм); 3 — контактные площадки 150×150 мкм, промежуток 100 мкм; 4 — платиновые резисторы (R1, R2, R3, R4, R5)

ниевой рамке-основании. Мембрана обладает достаточной прочностью (выдерживает сквозные проколы без разрушения) и термостойкостью (выдерживает более 10^6 термоциклов $20-400$ °С, а также разовые импульсные нагревы до 1000 °С). Чередующиеся слои двуоксида кремния, нитрида кремния и поликремния, оптимизированные по толщинам, последовательности и количеству, формируются методами термического окисления кремния и пиролитиче-

Параметры платиновых резисторов

Обозначение элемента	Назначение	Номинал сопротивлений, Ом
R1	Измерение температуры входного потока	1200
R2	Измерение потока	1200
R3	Нагреватель	700
R4	Измерение потока	1200
R5	Подстроечный резистор	1200

ского нанесения слоев с применением стандартных технологических процессов, используемых в микроэлектронике.

Изготовление платиновых резисторов выполняется методом магнетронного нанесения платины с последующим формированием рисунка и термообработкой для стабилизации параметров. Точность и воспроизводимость номиналов резисторов поддерживается на уровне $2-5\%$.

Максимальная мощность нагревательного элемента составляет 200 мВт. Рабочая температура нагревателя $300-400$ °С.

Внешний вид кристалла представлен на рис. 2.

Мембрана выполнена в виде прямоугольника размером $0,6 \times 1,8$ мм. Толщины образующих ее слоев подобраны таким образом, чтобы обеспечить минимальные тепловые потери в подложку и минимальную тепловую связь между элементами. Для выравнивания давления между нижней и верхней стороной мембраны в мембране формируют отверстия.

Конструкция мембраны позволяет проводить лазерную подгонку номиналов резисторов, а наличие дополнительных резисторов обеспечивает возможность организации цепей обратной связи для решения различных задач, например, управления током нагревателя для компенсации погрешности, обусловленной колебаниями температуры окружающей среды.

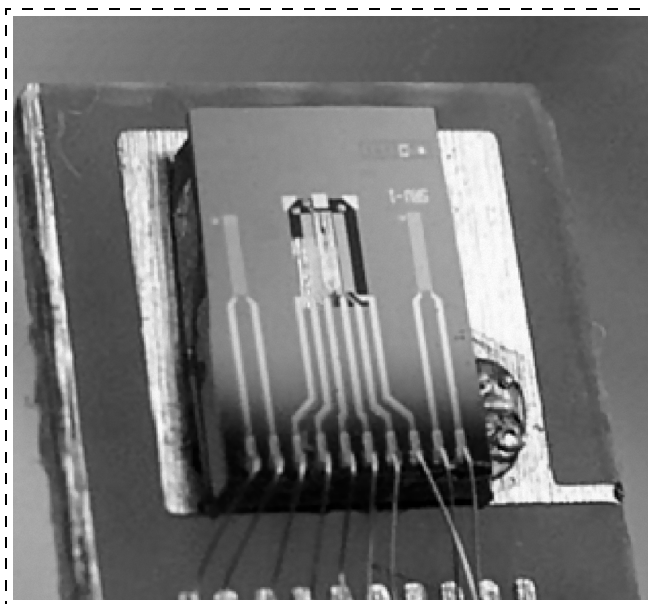


Рис. 2. Внешний вид кристалла

Предлагаемая конструкция кристалла сочетает конструктивные достоинства аналогов (кремниевая мембрана) с простотой конструкции и обеспечивает высокую точность и широкий диапазон измерения значений расхода газа.

Принцип действия и режим работы сенсора

Принцип действия датчика основан на преобразовании сигнала, формируемого под воздействием теплообмена протекающего потока с системой металлических проводников на кремниевой мембране, в электрический сигнал с нормированными характеристиками. При обтекании кристалла потоком газа происходит изменение температурного распределения на поверхности кристалла, что приводит к изменению электрических параметров терморезисторов.

Сопоставление установившегося температурного распределения в потоке и характера изменения сопротивления терморезисторов в зависимости от локального температурного воздействия позволяет установить зависимость скорости обтекания потока (и, соответственно, расхода) от разницы сопротивлений терморезисторов.

Сенсор может работать как в термоанемометрическом, так и в калориметрических режимах.

Калориметрический режим основан на зависимости разности нагрева симметричных объектов в потоке. В этом режиме центральный резистор выполняет роль элемента-нагревателя, боковые резисторы на мембране являются элементами-регистраторами.

Термоанемометрический режим организуется по принципу зависимости между потерей теплоты непрерывно нагреваемого тела и скоростью газа. В этом режиме любые два соседних резистора на мембране применяются в качестве нагревателей, притом разной мощности. Перераспределение теплоты между этими нагревателями в потоке приводит к изменению параметров резисторов.

Кроме того, в обоих режимах можно подавать ток на нагреватель не непрерывно, а короткими импульсами максимальной мощности с последующей регистрацией отклика. (Время отклика составляет ~ 5 мс, рекомендуемая длительность импульса — 20 мс с периодом 80 мс.) Это позволяет использовать сенсор при решении задач измерения быстро меняющихся параметров, а также расширить диапазон измерения сенсора.

В зависимости от специфики решаемой задачи в конкретном датчике может применяться один из этих режимов (или несколько режимов последова-



Рис. 3. Примеры использования разработанного кристалла в опытных образцах

тельно). Так, к примеру, калориметрический режим дает хорошую точность при регистрации сравнительно малых расходов, термоанемометрический режим характеризуется высокой чувствительностью, импульсный позволяет регистрировать большие расходы и обеспечивает самое наименьшее энергопотребление, что может найти применение в автономных приборах со встроенным элементом питания.

Примеры применения разработанного сенсора приведены на рис. 3.

Заключение

Таким образом, свойства и конструктивные особенности разработанных нами кристаллов термочувствительных элементов резистивного типа позволяют использовать их для решения широкого круга практических задач, связанных с расходомерией. Создаваемые на их основе сенсоры могут найти применение в бытовых приборах, лабораторных комплексах, диагностических системах и многих других областях. В настоящее время данные кристаллы успешно используются при разработке опытных образцов датчиков расхода воздуха для телекоммуникационных сетей, счетчиков расхода газа для ЖКХ, счетчиков расхода жидкости и газа для магистралей, датчиков массового расхода воздуха для автомобилей, датчиков скорости потока и других изделий.

Список литературы

1. Кремлевский П. П. Расходомеры и счетчики количества. Справочник: в 2-х ч. СПб.: Политехника, 2002. 409 с.
2. Березкин В. А., Борзов Е. И., Качуровский Ю. Г., Шкуропат И. Г., Шокин А. Н. Микроэлектронные газоаналитические приборы широкого применения // Электронная промышленность. 1994. № 7—8. С. 182—185.
3. Березкин В. А., Шкуропат И. Г., Шокин А. Н. Разработка мембранной технологии для создания приборного ряда датчиков // Электронная промышленность. 2004. № 3. С. 71—76.
4. Рабодзей А. Н., Халикеев В. М. БЭК 15. Датчики фирмы Honeywell. М.: Додэка, 2000.

И. А. Туркин, инженер-разработчик,
ОАО "МНИИРС", аспирант МИСиС, Москва
E-mail: stor007@bk.ru

ЭФФЕКТЫ ОТРАЖЕНИЯ ОТ КРАЕВ ЭКРАНИРУЮЩИХ ШИН В ОДНОНАПРАВЛЕННЫХ ВШП ФИЛЬТРОВ НА ПАВ

Рассматривается эффект частичного отражения поверхностной акустической волны (ПАВ) от краев экранирующих шин однонаправленного встречно-штыревого преобразователя и приведены рекомендации по уменьшению негативного влияния этого эффекта на амплитудно-частотную характеристику и групповое время запаздывания фильтров на ПАВ в полосе пропускания. Эффект исследовался на квазиеверном фильтре ФП-474 (70B38vl D), однако он может наблюдаться в целом ряде фильтров на ПАВ, имеющих сходные топологические особенности. Минимизация этого эффекта позволяет значительно уменьшить неравномерность частотных характеристик в полосе пропускания и тем самым вывести характеристики многих фильтров на ПАВ на качественно новый уровень.

Ключевые слова: поверхностная акустическая волна, фильтр, однонаправленный встречно-штыревой преобразователь, полоса пропускания, пульсации амплитуды, неравномерность группового времени запаздывания.

Введение

Фильтры на ПАВ являются одними из наиболее используемых в современных системах связи и устройствах беспроводной передачи данных вследствие их миниатюрности, надежности, термостабильности и возможности реализации сложных частотных характеристик. Неравномерность амплитудно-частотных характеристик (АЧХ) и пульсации группового времени запаздывания (ГВЗ) в полосе пропускания являются одними из наиболее важных показателей полосового фильтра на ПАВ наряду с такими, как вносимые потери, избирательность и коэффициент прямоугольности. Создание фильтра на ПАВ с малыми пульсациями АЧХ и ГВЗ, хорошей избирательностью и малыми вносимыми потерями всегда было и остается одной из приоритетных задач ПАВ-технологии, поставленных нуждами современной электроники [1, 2].

Эффекты отражения

Уже давно известен эффект отражения ПАВ от торцов кристалла. Принципиально он заключается в частич-

ном переотражении ПАВ, излученной встречно-штыревого преобразователя (ВШП) в обратном направлении, от края кристалла. Существуют различные методы борьбы с этим эффектом, среди которых такие, как грубая обработка торцов, нанесение на них акустически поглощающих материалов, изготовление чипов в форме параллелограмма для изменения направления вектора распространения переотраженной волны, а также некоторые другие.

Однако данный эффект является отнюдь не единственной причиной, вносящей дополнительные искажения в характеристики фильтров на ПАВ, в том числе современных квазиеверных фильтров на базе однонаправленных встречно-штыревых преобразователей (ОНВШП) [3, 4].

Недавно опытным путем было исследовано негативное влияние эффекта отражения ПАВ от краев экранирующих шин ОНВШП на частотные характеристики фильтров этого типа (на базе ОНВШП) в полосе пропускания.

Суть эффекта состоит в том, что при генерации ПАВ излучающим ОНВШП несмотря на направленность преобразователя некоторая часть ПАВ генерируется в обратном направлении (рис. 1).

Достигая края шины ОНВШП, волна частично переотражается и начинает распространяться вдоль основного направления, но с дополнительной задержкой, равной времени, необходимому ПАВ на преодоление этого дополнительного расстояния. Обратный эффект наблюдается, когда ПАВ достигает условного центра приемного ВШП: некоторая часть волны сразу не преобразуется в электромагнитный сигнал, а продолжает распространяться. Достигнув шины преобразователя, часть ПАВ также отражается по направлению к центру выходного преобразователя, где основная ее часть преобразуется в электро-

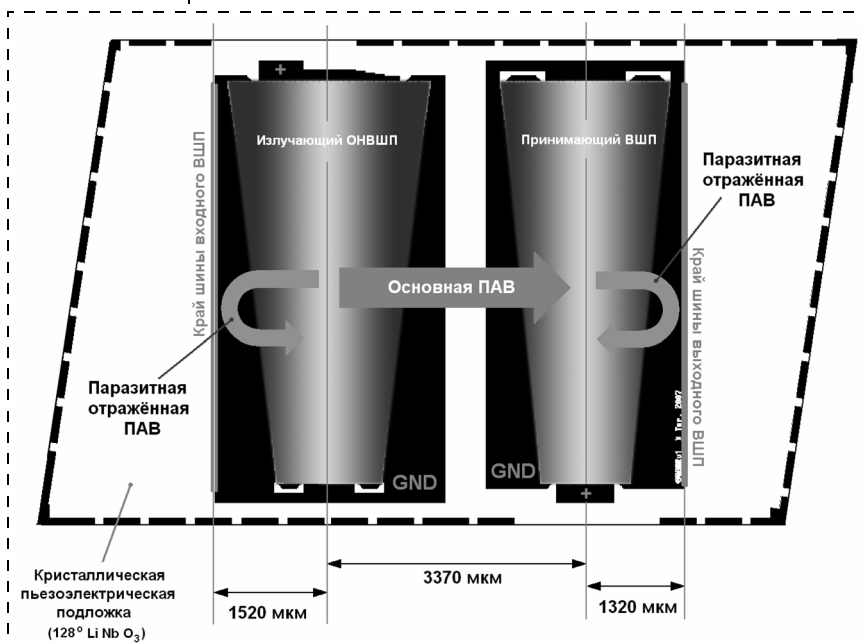


Рис. 1. Схема распространения основной и паразитных ПАВ в фильтре ФП-474 (70B38vl D)

магнитный сигнал также с некоторой дополнительной задержкой.

Так как в реальности мы имеем дело не с отдельным бесконечно малым импульсом сигнала, а с непрерывной генерацией ПАВ, то эти отраженные волны векторно суммируются с основными, что вносит дополнительные фазовые искажения. Характер этих искажений, а тем более их количественное влияние, предсказать довольно сложно вследствие некоторой неоднородности скорости ПАВ на частично металлизированной пьезоэлектрической подложке, а также из-за набегавшей фазовой неоднородности ПАВ в квазиверных ОНВШП в силу различия периодов электродов.

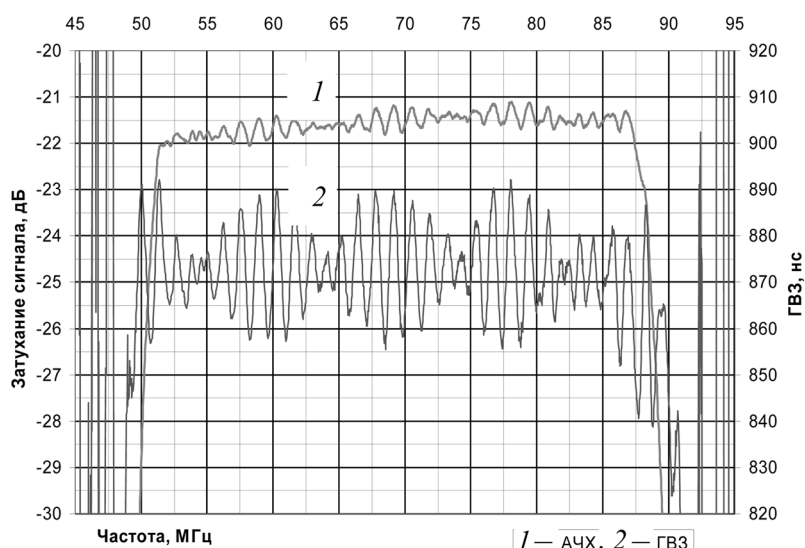
Эксперимент и анализ характеристик

Для изучения этого вопроса был проведен эксперимент с широкополосным фильтром ФП-474 на 70 МГц, в ходе которого были проведены измерения его импульсной характеристики АЧХ и ГВЗ (рис. 2). На снятой импульсной характеристике были обнаружены два аномальных пика, приблизительно соответствующих удвоенному времени запаздывания с некоторым отклонением в обе стороны и находящихся на уровне -35 дБ от пика основного сигнала (рис. 2, б). Для выяснения причин их возникновения было проведено сопоставление времен задержки этих пиков с основными расстояниями на структуре ВШП и средней скоростью распространения ПАВ на металлизированной поверхности в данном срезе (128°LiNbO_3), составляющей ~ 3850 м/с. Расстояние между центрами ОНВШП структуры составляло ~ 3370 мкм, расстояния от центра 1-го и 2-го ВШП до их краев шин составляли ~ 1520 мкм и ~ 1320 мкм соответственно (см. рис. 1).

Если принять во внимание расстояния между центрами ОНВШП структуры и расстояния от центра 1-го и 2-го ВШП до их краев шин, то, учитывая реальную скорость распространения ПАВ, можно рассчитать дополнительное время запаздывания ПАВ, отражающейся от краев шин (см. рис. 1).

Зная значение скорости ПАВ в кристалле (~ 3850 м/с для металлизированной поверхности и ~ 3980 м/с для свободной поверхности в кристалле LiNbO_3 среза 128°) и расстояния от центра 1-го и 2-го ВШП до их краев шин, можно рассчитать дополнительное время запаздывания отраженных ПАВ: $(1520 \text{ мкм}/3850 \text{ м/с})2 =$

АЧХ и ГВЗ в полосе (ФП-474)
(Влияние отражения от краёв шин)



Импульсная характеристика ФП-474

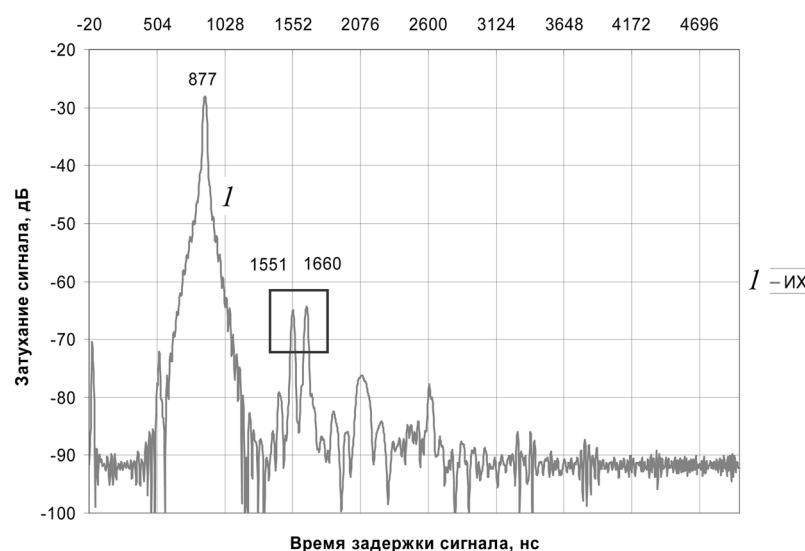


Рис. 2. Частотная (АЧХ и ГВЗ) (а) и импульсная (б) характеристики фильтра ФП-474 (70В38v1 D)

$= 0,790$ мкс для 1-го и $(1320 \text{ мкм}/3850 \text{ м/с})2 = 0,686$ мкс для 2-го ВШП соответственно (коэффициент 2 обусловлен тем, что волна проходит в прямом и обратном направлении — см. рис. 1).

Прибавив эти значения дополнительного времени запаздывания к среднему ГВЗ ($\sim 0,877$ мкс) и сопоставив полученные значения со значениями пиков на реальной импульсной характеристике (ИХ) ФП-474 (70В38v1 D) на рис. 2, б, можно наблюдать очень близкое их соответствие, что подтверждает справедливость вышеизложенного. Таким образом, по характеристикам фильтра, представленным на рис. 2, видно влияние эффекта отражения ПАВ от краев экранирующих шин.

Как известно, основными механизмами отражения ПАВ от металлических электродов являются закорачивание электрического поля ПАВ металлической пленкой и накопление реактивной энергии под электродами. Очевидно, что для устранения влияния отраженной ПАВ на характеристику необходимо каким-либо способом устранить появление отраженной ПАВ или погасить ее энергию еще до отражения.

Устранить ее появление можно, избавившись от экранирующей шины на стадии разработки топологии, но это, в свою очередь, может изменить другие характеристики фильтра, а в данном конкретном случае не представляется возможным в силу того, что фильтр уже изготовлен. Однако можно в известной степени погасить отраженную волну, если нанести акустопоглощающий материал не только на торцы кристалла, но и непосредственно на экранирующую шину (похожая операция применялась ранее для снижения отраженных волн в фильтрах на стандартных двунаправленных ВШП), не затрагивая активной части топологии ВШП, как показано на рис. 3.

В качестве акустопоглощающих материалов обычно используются различные кремнийорганические соединения типа эластосилов или эпоксидные смолы с добавлением тяжелых оксидов для увеличения плотности (эффективность акустического поглощения увеличивается при приближении плотности акустопоглощающего материала к плотности кристалла).

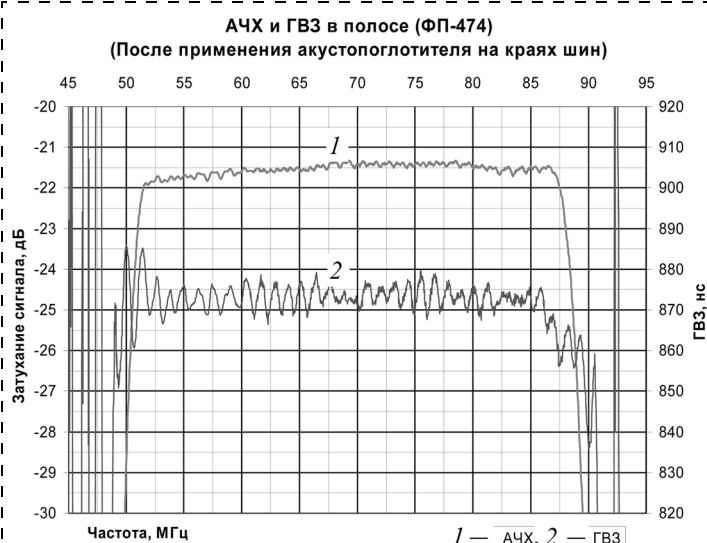
Упомянутая выше операция и была проделана с фильтром ФП-474 (70B38vl D), после чего были проведены повторные измерения его импульсной и частотных характеристик в согласованном режиме (рис. 4).

Из характеристик на рис. 4 видно, что паразитные пики на импульсной характеристике уменьшили свою интенсивность почти на 20 дБ по сравнению с первым случаем и практически сливаются с шумовым фоном. Также можно наблюдать уменьшение пульсаций АЧХ и ГВЗ в полосе пропускания более чем в 2 раза, что, очевидно, является следствием отсутствия влияния описанных выше паразитных ПАВ, отражающихся от краев экранирующих шин.

Влияние отраженных паразитных ПАВ на пульсации АЧХ и ГВЗ в полосе пропускания оказалось весьма значительно, и его устранение в данном случае позволило получить качественный новый полосовой фильтр, применение которого возможно в уже гораздо более требовательных к этим параметрам радиоэлектронных и навигационных системах. Следует добавить, что с помощью описанного способа удалось эффективно уменьшить пульсации АЧХ и неравномерность ГВЗ в полосе пропускания у целого ряда широкополосных квазиверных фильтров на ПАВ на



Рис. 3. Схема распространения основной и поглощения паразитных ПАВ (фото фильтра ФП-474 70B38vl D в корпусе DIP 151.15-8 19,5 × 14,5 мм с нанесенным акустопоглотителем)



а)



б)

Рис. 4. Частотная (АЧХ и ГВЗ) (а) и импульсная (б) характеристики фильтра ФП-474 (70B38vl D) после устранения влияния паразитных отраженных волн

Влияние ЭОК на характеристики фильтров

Параметр	Влияние ЭОК							
	Присутствует				Подавлено			
	Фильтр							
	ФП-59	ФП-473	ФП-474	ФП-483	ФП-59	ФП-473	ФП-474	ФП-483
Центральная частота f_0 , МГц	140	70	70	37	140	70	70	37
Вносимые потери, дБ	22,5	17,7	18,9	23	22,5	17,7	18,9	23
Полоса пропускания по уровню -1 дБ, МГц	76,5	27,1	34,8	21,8	76,5	27,1	34,8	21,8
Полоса пропускания по уровню -3 дБ, МГц	79,6	28,4	37,4	22,5	79,6	28,4	37,4	22,5
Полоса пропускания по уровню -40 дБ, МГц	90	33	43,1	25,4	90	33	43,1	25,4
Неравномерность АЧХ в полосе частот 70 % от BW3, дБ	0,8	0,9	0,9	0,8	0,4	0,5	0,6	0,4
Неравномерность ГВЗ в полосе частот 70 % от BW3, нс	12	30	35	70	7	10	12	30
Затухание в полосе заграждения, дБ	40	45	40	40	40	45	40	40
Температурный коэффициент, ppm/°C	76	90	76	76	76	90	76	76
Рабочая температура, °C	-50/+85							
Примечание: BW3 — полоса пропускания по уровню -3 дБ от максимума в полосе.								

базе ОНВШП, среди которых ФП-59 (рис. 5 справа), ФП-483, ФП-473 (рис. 5 слева) и ФП-474.

Все перечисленные фильтры являются последними разработками технического центра функциональной электроники ОАО "МНИИРС" (три последних разработаны автором) и по многим своим показателям на момент написания статьи превосходили аналоги таких знаменитых зарубежных фирм, как SAW-TEK, TAISAW TECHNOLOGY и некоторых других.

Наиболее типичные показатели образцов этих фильтров, измеренные до и после минимизации акустопоглотителем эффекта отражения ПАВ от краев шин (ЭОК), приведены в таблице.

Во всех этих фильтрах пульсации АЧХ и неравномерность ГВЗ в полосе пропускания были уменьшены посредством нанесения акустопоглотителя приблизительно в 1,5—2 и 2—3 раза соответственно,

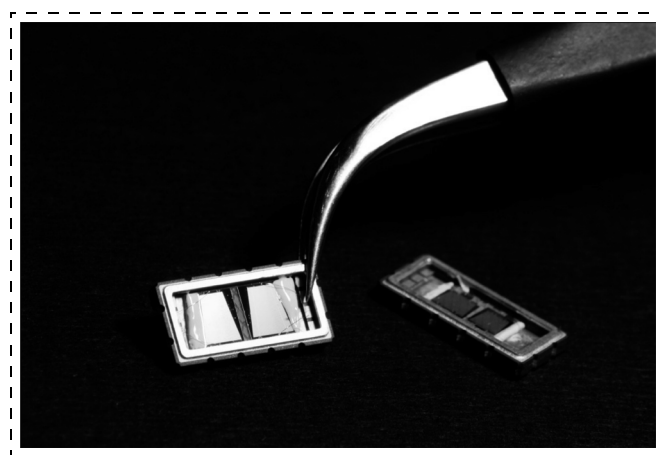


Рис. 5. Фото квазиверных фильтров на ПАВ на базе ОНВШП фильтров в металлокерамическом устройстве для поверхностного монтажа SMD (Surface Mount Device)-корпусе $13,3 \times 6,5$ мм (не закрытые)

что является значительным их качественным улучшением и расширяет спектр их применения.

Закключение

В ходе исследований частотных характеристик многих фильтров на базе квазиверных ОНВШП было выявлено и качественно оценено влияние эффекта отражения ПАВ от внешних краев экранирующих шин на пульсации частотных характеристик в полосе пропускания. Был также найден эффективный метод минимизации этого негативного влияния. Исключение этого эффекта позволяет значительно уменьшить неравномерность частотных характеристик (АЧХ и ГВЗ) в полосе пропускания и тем самым вывести характеристики многих фильтров на ПАВ со сходными топологическими особенностями на качественно новый уровень, что может существенно расширить область их применения.

Автор выражает благодарность сотрудникам технического центра функциональной электроники ОАО "МНИИРС" за предоставленные материалы по фильтрам на ПАВ, а также исследовательской и технологической базы для проведения соответствующих экспериментов.

Список литературы

1. Туркин И. А. Фильтры на ПАВ — ускоренные методы проектирования // Электроника НТБ РИЦ "Техносфера" 2008. № 2.
2. Фильтры на поверхностных акустических волнах / Под ред. Г. Мэтьюза. М.: "Радио и связь", 1981.
3. Yatsuda H. Design Technique for SAW Filters Using Slanted Finger Interdigital Transducers // IEEE Trans. on UFFC. 1997. Vol. 44. N 2.
4. Brown R. B. and Gopani S. Apodized Single-phase Unidirectional Transducer SAW Devices // Proceedings of the IEEE Ultrasonics Symposium. 1991. P. 231—234.

В. В. Амеличев¹, канд. техн. наук, нач. лаб.,
В. М. Буданов², канд. физ.-мат. наук, вед. науч. сотр.,
Д. В. Гусев¹, ст. науч. сотр.,
М. Э. Соколов², д-р мед. наук, зав. каф.,
В. С. Суханов¹, нач. лаб., **Р. Д. Тихонов**¹, канд.
 техн. наук, ст. науч. сотр.

¹НПК "Технологический центр" МИЭТ,
²МГУ

E-mail: r.tikhonov@tcen.ru

РАЗРАБОТКА И СОЗДАНИЕ ОПЫТНЫХ ОБРАЗЦОВ ИСКУССТВЕННЫХ ТАКТИЛЬНЫХ МЕХАНОРЕЦЕПТОРОВ ДЛЯ ЭНДОСКОПИИ

Описан конструктивно-технологический базис изготовления двумерной матрицы интегральных тензорезистивных преобразователей давления МИПД-19 с 19 чувствительными элементами, сформированными на кремниевом чипе, для тактильных датчиков, применяемых для диагностики при эндохирургии. Матрица имеет разрешающую способность 2,5 мм; среднее значение чувствительности равно 22,1 мВ при напряжении питания моста 2,5 В и давлении 40 кПа. Абсолютная чувствительность измерителей парциального давления практически не зависит от значения начального разбаланса моста.

Ключевые слова: тензорезистивный преобразователь, интегральный тактильный датчик.

В тех случаях, когда в послеоперационном периоде больной не столько страдает от травмы, связанной с удалением конкретного органа, сколько с последствиями хирургического доступа к нему, операции выполняются методами эндохирургии. В результате повсеместного внедрения эндохирургии снижается время пребывания пациента в стационаре, уменьшается количество применяемых наркотических обезболивающих средств в послеоперационном периоде, резко снижается число осложнений. Эти операции признаны "золотым стандартом" в здравоохранении. Масштабность задачи определяется тем, что только в Российской Федерации ежегодно выполняется более полумиллиона таких операций.

При "открытой" операции врач обычно проводит ощупывание внутренних органов для уточнения, например, размеров опухоли, ее взаимодействия с окружающими тканями, глубины распространения процесса, наличия увеличенных лимфатических узлов. Невозможность осуществления тактильной диагностики при эндоскопической операции, обусловленная малыми размерами разрезов, сдерживает развитие эндоскопической хирургии, что обуславливает актуальность предлагаемой разработки тактильных механорецепторов.

Разрабатываются технологии использования тактильных датчиков с применением конденсаторов,

пьезорезистивных элементов не для тактильного обследования недоступных для обычной пальпации мест, а для поверхностного "ощупывания". Главным отличием предлагаемого разрабатываемого устройства является возможность ощупывания внутри полостей человеческого организма.

Проект направлен на разработку следующих технологий изготовления и применения эндоскопических приборов:

- технологии изготовления и применения эндоскопических приборов, способных осуществлять тактильную диагностику заболеваний;
- технологии применения методов обработки получаемых изображений и распознавания образов, методов идентификации напряженно-деформированного состояния биологической ткани;
- тактильного механорецептора с приведением его размеров к значениям, характерным для эндоскопических приборов, при высокой разрешающей способности;
- опытных образцов эндоскопических приборов, использующих методы тактильной механорецепции.

Для изучения основных биотехнологических параметров тактильного механорецептора был создан первый вариант макета экспериментальной установки [1] в результате совместной работы предприятия оборонного комплекса и научно-исследовательского подразделения НПК "Технологический центр" МИЭТ.

На контактирующей поверхности установлены датчики, выполненные в виде упругих камер, заполненных воспринимающей давление средой, причем эти камеры-датчики размещены по площади так, что фиксируют раздельно плотность и неоднородность участков биологической ткани с получением эффекта "осязания", регистрируемого "цифровым" способом компьютерной системой фиксации и обработки полученных данных с возможностью динамического сопоставления.

Ключевыми базовыми технологическими процессами создания блока восприятия характеристик биологической ткани являются циклы объемной микрообработки кремния для создания интегральных преобразователей мембранного и балочного типов, а также циклы поверхностной микромеханики, позволяющие не только существенно снизить площадь чувствительного элемента датчика давления (до 0,1 мм²), но и сформировать на кремниевом чипе двумерную матрицу чувствительных элементов.

Аппарат тактильной диагностики предназначен для использования во время операции. Он вводится, например, в брюшную полость через разрез вместе с другими инструментами и позволяет "ощупать" органы и ткани.

Для использования в эндоскопических аппаратах должен быть разработан тактильный механорецептор. Он должен состоять из системы датчиков, распределенных на плоской чувствительной поверхно-

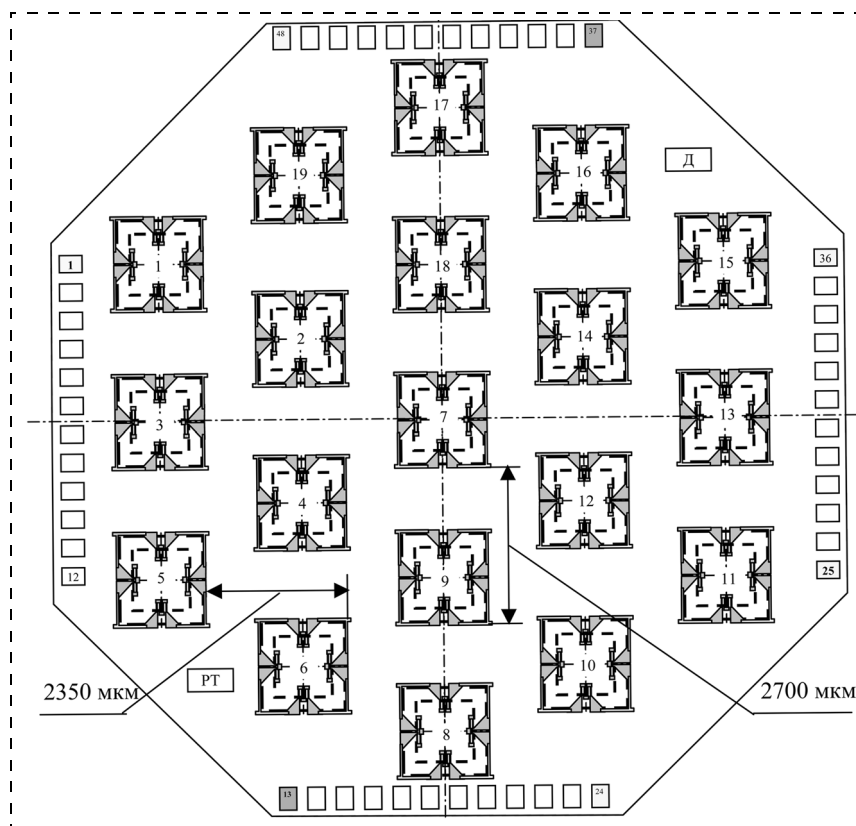


Рис. 1. Топологический эскиз матрицы преобразователей давления МИПД-19

сти прибора и измеряющих локальные давления при взаимодействии с исследуемой тканью. Двумерная матрица тактильных сенсоров с элементами предварительной обработки сигналов представляет собой электронный блок (узел), предназначенный для встраивания в тактильный датчик. Разрабатываемый узел предназначен для преобразования локальных давлений в электрические напряжения постоянного тока и преобразование этих напряжений в цифро-

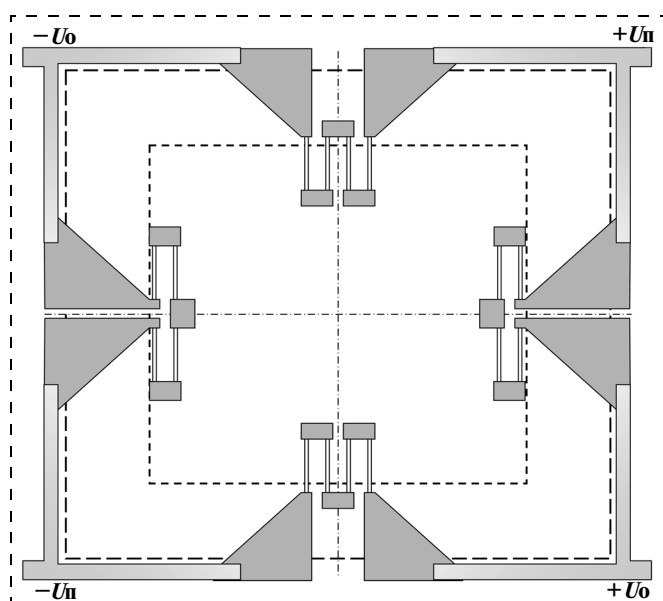


Рис. 2. Топологический эскиз интегрального преобразователя давления

вую форму с передачей информации по последовательному интерфейсу.

Для подачи локальных давлений узел должен иметь входные отверстия, расположенные в одной плоскости и обеспечивающие герметичное под-соединение чувствительной многока-мерной мембраны.

Главная функция — преобразова-ние локальных давлений (силы) в электрический сигнал — обеспечива-ется матрицей чувствительных эле-ментов, выполненной на одном кри-стале.

Рассматриваются чувствительные элементы, работающие исключитель-но на пьезоэлектрическом эффекте в полупроводнике (кремнии). Каждый чувствительный элемент представляет собой тензорезистивный мост, име-ющий два вывода для подачи питания и эти выводы объединены для всех эле-ментов матрицы. Два вывода моста предназначены для снятия выходного дифференциального сигнала.

В настоящее время разрабатывается и изготавливается матрица МИПД-19. Матрица включает в себя 19 чувстви-тельных элементов.

Кристалл МИПД-19 имеет приближенную к кругу восьмиугольную форму, чтобы вписаться в диаметр 15 мм, для чего его размеры составляют 14 мм между ортогональными сторонами, длиной не более 6,4 мм (рис. 1). Угловые скосы выполняются методом анизотропного химического травления. Центры инте-гральных преобразователей давления (ИПД) распо-лагаются в узлах сетки с шагом по координате $X = 2,35$ мм и по $Y = 2,70$ мм. Кристалл МИПД-19 содержит 48 внешних выводов, которые располага-ются по 12 штук, вдоль четырех сторон. Размер кон-тактной площадки составляет $0,4 \times 0,3$ мм, а шаг между ними — 0,5 мм. Часть контактной площадки ($0,25 \times 0,30$ мм) может быть покрыта никелем и при необходимости облужена припоем.

Технические характеристики чувствительного элемента аналогичны одиночным датчикам дав-ления MLX90240 фирмы Melexis [2]. По конструкции кремниевой мембраны ИПД является аналогом MLX90240, рассчитанного на применение в диа-пазоне давлений 0...35 кПа, с чувствительностью 0,4...0,7 мВ/В/кПа и сопротивлением тензорези-стивного моста $13,5 \pm 2$ кОм. На рис. 2 изображен то-пологический эскиз ИПД для кристалла МИПД-19. Для контроля температуры кристалла используются диод (Д) и диффузионный резистор (РТ) (см. рис. 1).

Исходным материалом является кремниевая под-ложка КЭФ-4,5 (100) с двусторонней полировкой, в которой методами микроэлектроники создаются мембраны, диффузионные области тензорезисторов

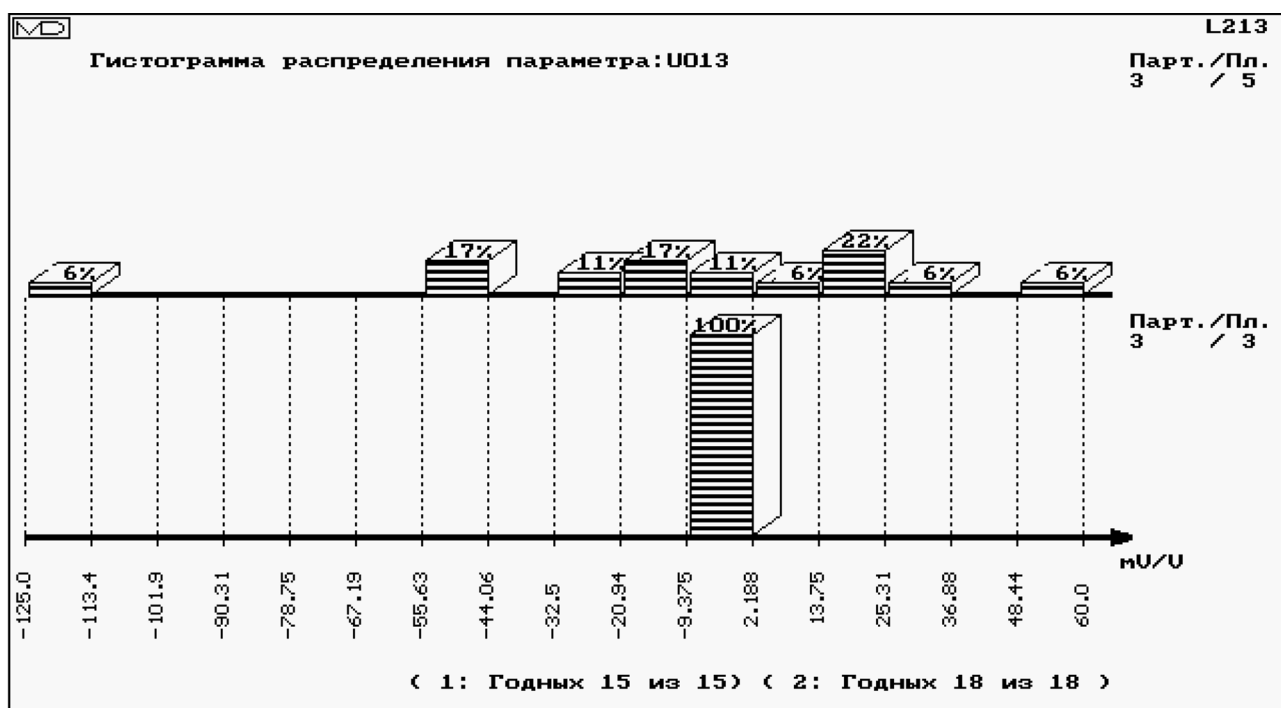


Рис. 4. Гистограммы распределения разбаланса моста для двух пластин № № 3, 5 с различной обработкой оксида над мембранами

и p^+ -выводов, а также алюминиевые шины и контактные площадки. Соединение ИПД с контактными площадками реализовано одним уровнем металла. Технология изготовления МИПД-19 состоит из 10 фотолитографических циклов, один из которых выполняется по обратной стороне кремниевых пластин.

Матрица МИПД-19 устанавливается на основание с отверстиями, через которые передается давление. Основание изготавливается методами производства многослойных многослойных печатных плат [3]. За матрицей крепится схема обработки сигналов с тензорезистивных мостов. Детали устройства показаны на рис. 3 (см. четвертую сторону обложки).

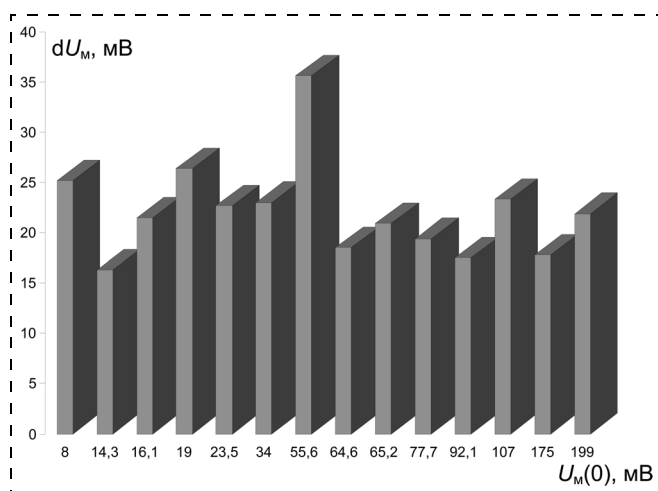


Рис. 5. Корреляция параметров начального разбаланса и сигнала ИПД при давлении 40 кПа

Изготовление матричных преобразователей требует отработки технологии, обеспечивающей минимальный разбаланс между отдельными датчиками. Для этого проведены технические мероприятия, обеспечивающие снижение разброса до значения менее 10 мВ/В. На рис. 4 представлены распределения разбаланса для двух пластин, одна из которых (№ 3) имела сокращенный цикл обработки оксида над поверхностью мембраны.

Как видно на рис. 5 абсолютная чувствительность измерителей парциального давления практически не зависит от значения начального разбаланса моста. Среднее значение чувствительности равно 22,1 мВ (16... 36 мВ) при напряжении питания моста 2,5 В и давлении 40 кПа, т. е. 0,221 мВ/В/кПа или 22,1 мВ/В/бар.

Для одиночных датчиков фирмы Melexis MLX90240 дается типовое значение чувствительности 58 мВ/В/бар с разбросом в диапазоне 43...75 мВ/В/бар при напряжении питания 5 В и давлении до 0,35 бар.

Отработка технологии защиты поверхности мембран позволяет свести к минимуму начальный разбаланс мостов в матрице интегральных преобразователей давления для тактильных датчиков. Необходимо продолжить отработку технологии формирования мембран для повышения чувствительности.

В ходе работы разработан [4] и изготовлен матричный тензочувствительный тактильный датчик. На рис. 6 (см. четвертую сторону обложки) представлена фотография датчика с корпусом для измерения чувствительности при подаче давления воздуха внутри корпуса.

Развитие тактильной диагностики с большой вероятностью приведет к широкому внедрению эндоскопии в медицинскую практику нашей страны и других развитых стран для лечения социально значимых заболеваний.

Список литературы

1. Садовничий В. А., Григорьев А. И., Окунев Ю. М., Соколов М. Э., Буданов В. М., Мартыненко Ю. Г. Искусственный тактильный механорецептор. Теория, опыт созда-

ния, экспериментальная апробация // Технология живых систем. 2005. Т. 2. № 4—5. С. 3—10.

2. <http://www.htmldatasheet.ru/melexis/mlx90240.htm> — Сайт фирмы melexis.

3. <http://www.rezonit.ru/pcb/production/nonstandard/> — Сайт фирмы "Резонит", изготовление печатных плат.

4. Разработка технологий и создание опытных образцов двумерной матрицы тактильных сенсоров с элементами предварительной обработки информации по теме "Разработка рабочей технической документации опытного образца: отчет об опытно-конструкторской работе. Этап второй (промежуточный). Шифр Федеральной целевой программы "2007-2-2.2-04-04". № ГР 01200709727.

УДК 531.787.084.2:629.735

Е. М. Белозубов, канд. техн. наук, нач. группы,
Н. Е. Белозубова, инженер,
В. А. Васильев, д-р техн. наук, проф.
ФГУП "НИИ физических измерений", г. Пенза
E-mail: niifi@sura.ru

ТОНКОПЛЕНОЧНЫЕ МИКРОЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ И ДАТЧИКИ НА ИХ ОСНОВЕ

Рассмотрены тонкопленочные тензорезисторные и емкостные микроэлектромеханические системы (МЭМС). Предложена их классификация. Представлены обобщенные системные модели тонкопленочных емкостных МЭМС-структур и датчиков на их основе.

Ключевые слова: тонкопленочные микроэлектромеханические системы (ТМЭМС); тонкопленочные тензорезисторные МЭМС (ТТМЭМС); тонкопленочные емкостные МЭМС (ТЕМЭМС); обобщенная системная модель.

Наряду с широко известными микроэлектромеханическими системами (МЭМС), основанными на кремниевой технологии, существуют МЭМС, базирующиеся на тонкопленочной технологии. Тонкопленочные микроэлектромеханические системы (ТМЭМС) в настоящее время уже достаточно широко используются в качестве чувствительных элементов датчиков различных физических величин [1]. Отличительной особенностью современных ТМЭМС является возможность работы в экстремальных условиях эксплуатации, часто недоступных для других систем. Например, рабочий диапазон температур датчиков давления, построенных на основе ТМЭМС, находится в пределах от -253 до $+300$ °С. Поэтому датчики давления на основе ТМЭМС нашли самое широкое применение в системах телеметрии и управления современных ракетных комплексов нашей страны. В настоящее время для этих целей наиболее широко используются два достаточно больших класса ТМЭМС:

- тонкопленочные тензорезисторные МЭМС (ТТМЭМС);
- тонкопленочные емкостные МЭМС (ТЕМЭМС).

Принцип действия ТТМЭМС основан на преобразовании деформаций упругого элемента, возникающих при воздействии информационных параметров (усилий, давлений, температур и т. д.), в изменение электрического сопротивления тонкопленочных тензорезисторов, размещенных на упругом элементе.

Принцип действия ТЕМЭМС основан на преобразовании перемещений мембраны упругого элемента, возникающих при воздействии информационных параметров, в изменение электрической емкости тонкопленочного конденсатора, по крайней мере один из электродов которого размещен на мембране упругого элемента или связан с ней, например, с помощью механической или гидравлической связи.

Предлагаемая далее классификация ТМЭМС не претендует на абсолютную полноту. Тем более, что, возможно, она является одной из первых попыток такого рода. В зависимости от вида упругого элемента среди ТТМЭМС выделяют:

- ТТМЭМС с балочным упругим элементом;
- ТТМЭМС с мембранным упругим элементом.

В зависимости от вида балочного упругого элемента ТТМЭМС с балочным упругим элементом можно разделить:

- ТТМЭМС с балкой равной толщины;
- ТТМЭМС с балкой равного сопротивления;
- ТТМЭМС с балкой в виде параллелепипеда с отверстиями в боковых гранях [2];
- ТТМЭМС с балкой в виде параллелепипеда со сквозными прорезями в боковых гранях и перемычкой, соединяющей концы балки [3].

В зависимости от вида мембранного упругого элемента среди ТТМЭМС с мембранным упругим элементом можно выделить:

- ТТМЭМС с плоской мембраной;
- ТТМЭМС с мембраной, имеющей жесткий центр.

ТТМЭМС с плоской мембраной могут быть выполнены в виде:

- ТТМЭМС со свободноопертой мембраной;
- ТТМЭМС с жесткозащемленной мембраной.

Среди ТТМЭМС с мембраной, имеющей жесткий центр, можно выделить:

- ТТМЭМС с мембраной, имеющей сплошной жесткий центр;
- ТТМЭМС с мембраной, имеющей жесткий центр с выточкой [4].

В зависимости от наличия взаимосвязи размеров мембраны и периферийного основания упругого элемента среди ТТМЭМС можно выделить:

- ТТМЭМС с взаимосвязанными размерами мембраны и периферийного основания упругого элемента;
- ТТМЭМС с невзаимосвязанными размерами мембраны и периферийного основания упругого элемента.

Среди ТТМЭМС с взаимосвязанными размерами мембраны и периферийного основания упругого элемента можно выделить:

- ТТМЭМС с полостями в мембране [5];
- ТТМЭМС с термосбалансированным упругим элементом [6].

В зависимости от наличия дискретности тензорезисторов ТТМЭМС целесообразно разделить следующим образом:

- ТТМЭМС с непрерывными тензорезисторами;
- ТТМЭМС с дискретными тензорезисторами.

В зависимости от формы тензорезисторов ТТМЭМС с непрерывными тензорезисторами подразделяются следующим образом:

- ТТМЭМС с тензорезисторами в виде прямоугольников;
- ТТМЭМС с тензорезисторами в виде трапеций;
- ТТМЭМС с тензорезисторами в виде кольцевых секторов;
- ТТМЭМС с тензорезисторами в виде комбинаций прямоугольников, трапеций и кольцевых секторов.

Кроме того, среди ТТМЭМС с непрерывными тензорезисторами можно выделить:

- ТТМЭМС с неидентичными непрерывными тензорезисторами;
- ТТМЭМС с идентичными непрерывными тензорезисторами.

Тензорезисторы в ТТМЭМС с дискретными тензорезисторами выполнены в виде отдельных тензоэлементов, соединенных между собой тонкопленочными перемычками, электрическое сопротивление которых существенно меньше сопротивления тензоэлементов. В зависимости от соотношений формы и размеров тензоэлементов ТТМЭМС с дискретными тензорезисторами предлагается разделить следующим образом:

- ТТМЭМС с неидентичными тензоэлементами;
- ТТМЭМС с идентичными тензоэлементами.

В ТТМЭМС с неидентичными тензоэлементами тензоэлементы различаются по форме или размерам, а в ТТМЭМС с идентичными тензоэлементами тензоэлементы одинаковы по форме и размерам. Применение ТТМЭМС с идентичными тензоэлементами вследствие возможности оптимального размещения тензорезисторов в зонах максимальных деформаций от измеряемого давления и минимального градиента температур позволяет существенно увеличить чувствительность к измеряемому давлению и уменьшить погрешность измерения давления при воздействии нестационарных температур [7].

Среди ТТМЭМС с идентичными тензоэлементами предлагается выделять [7]:

- ТТМЭМС с идентичными тензоэлементами в виде квадратов;
- ТТМЭМС с идентичными тензоэлементами в виде квадратов и квадратной мембраной;
- ТТМЭМС с идентичными тензоэлементами в виде квадратов на границе мембраны;
- ТТМЭМС с тензоэлементами в виде кольцевых секторов;
- ТТМЭМС с идентичными тензоэлементами и тонкой заделкой;
- ТТМЭМС с идентичными тензоэлементами в виде параллельных квадратов;
- ТТМЭМС с идентичными тензоэлементами и гофрированной заделкой;
- ТТМЭМС с тензоэлементами в виде фрагментов колец;
- ТТМЭМС с тензоэлементами в виде кольцевых секторов на границе мембраны;
- ТТМЭМС с тензоэлементами в виде сочетаний кольцевых секторов и фрагментов;
- ТТМЭМС с тензоэлементами в виде отрезков колец;
- ТТМЭМС с оптимизированными перемычками;
- ТТМЭМС с идентичными тензоэлементами и идентичными перемычками.

Кроме того, в случае выполнения ТТМЭМС с идентичными тензоэлементами в двухканальном исполнении они могут быть выполнены как с асимметричными, так и с симметричными каналами. Уменьшение погрешности измерений при воздействии нестационарных температур достигается также применением термозащитных пленок [8].

В зависимости от наличия термозащитной пленки ТТМЭМС целесообразно разделить следующим образом:

- ТТМЭМС без термозащитной пленки;
- ТТМЭМС с термозащитной пленкой.

В ТТМЭМС с термозащитной пленкой предлагается выделять [8]:

- ТТМЭМС с термозащитной пленкой на приемной поверхности мембраны;
- ТТМЭМС с термозащитной пленкой на всей приемной полости;
- ТТМЭМС с профилированной термозащитной пленкой;

- ТТМЭМС с защищенной термозащитной пленкой;
- ТТМЭМС с защищенной термозащитной пленкой на упругом элементе.

Наличие микрорельефа позволяет улучшать характеристики ТТМЭМС за счет повышения адгезии и площади контактируемых элементов. В зависимости от наличия микрорельефа на упругом элементе ТТМЭМС можно разделить следующим образом:

- ТТМЭМС с микрорельефом на упругом элементе;
- ТТМЭМС без микрорельефа на упругом элементе.

В ТТМЭМС с микрорельефом на упругом элементе можно выделить:

- ТТМЭМС с микрорельефом на мембране;
- ТТМЭМС с микрорельефом на боковой поверхности упругого элемента.

Применение ТЕМЭМС для создания датчиков давления, работоспособных при воздействии температур широкого диапазона, в настоящее время является весьма перспективным направлением вследствие высокой стабильности зависимости емкости от температуры. В то же время необходимость измерения давлений при воздействии температур широкого диапазона требует учета и компенсации влияния температур на характеристики тонкопленочных емкостных МЭМС.

Использование традиционных датчиков температуры в тонкопленочных емкостных МЭМС-структурах связано с определенными трудностями, вызванными несовместимостью технологий изготовления и недостаточной стойкостью и стабильностью этих датчиков при воздействии температур широкого диапазона. Поэтому для емкостных МЭМС, применяемых для измерения давления, особенно при воздействии нестационарных температур, целесообразно в качестве датчика температуры использовать термозависимую емкость. При этом возможно построение таких МЭМС-структур с термозависимой емкостью, размещенной как в разных плоскостях с измерительной емкостью, так и в одной плоскости с измерительной емкостью. В первом случае будем называть ТЕМЭМС с непланарным размещением термозависимой емкости, а во втором — с планарным. Так как в общем случае третья емкость может быть выполнена зависимой не только от температуры, но и от какого-либо другого неинформативного воздействия, например от виброускорений, то назовем ее неинформативно-зависимой емкостью. Тогда ТЕМЭМС можно классифицировать в зависимости от числа емкостей следующим образом:

- ТЕМЭМС с измерительной емкостью;
- ТЕМЭМС с измерительной и опорной емкостями;
- ТЕМЭМС с измерительной, опорной и неинформативно-зависимой емкостями.

Преимущества тонкопленочных емкостных МЭМС наиболее полно проявляются при учете фак-

тических температур электродов конденсаторов. Если позволяют размеры и диапазон рабочих температур МЭМС-структур, то достаточно традиционным направлением является использование для этих целей датчиков температуры. В качестве таких датчиков используются терморезисторы, диоды, термопары. Общими их недостатками являются необходимость наличия свободного места рядом с электродами и достаточно большая погрешность измерения при воздействии нестационарных температур вследствие отличия температуры электродов от температуры места установки датчика температуры и влияния термического сопротивления между местом установки и датчиком температуры.

В связи с этим одним из оптимальных направлений уменьшения температурной погрешности МЭМС-структур является непосредственное измерение температуры электродов. Для этого электроды конденсаторов выполняют из терморезистивного материала и по изменению сопротивления электродов судят об их температурах. Для повышения сопротивления электродов их выполняют в виде определенным образом расположенной змейки [9]. Поэтому ТЕМЭМС можно классифицировать в зависимости от возможности измерения температур электродов следующим образом:

- ТЕМЭМС без измерения температур электродов;
- ТЕМЭМС с измерением температур электродов.

Возможности предложенных конструктивно-технологических решений ограничены возможностями терморезистивного материала, из которого выполнены электроды.

ТЕМЭМС можно классифицировать в зависимости от типа диэлектрика между электродами и другими элементами системы:

- ТЕМЭМС с тонкопленочным диэлектриком;
- ТЕМЭМС с массивным диэлектриком.

Граница между этими диэлектриками достаточно условна. Традиционно пленки толщиной менее 5 мкм относят к тонким пленкам. Соответственно материалы толщиной более 5 мкм относят к массивным. Принципиальное отличие тонкопленочного и массивного диэлектрика заключается в существенном различии свойств. Например, тонкопленочные диэлектрики более технологичны, их изготавливают на оборудовании, аналогичном оборудованию, которое используется при формировании электродов или даже на том же самом оборудовании. Существенным недостатком тонкопленочных диэлектриков является сравнительно невысокая электрическая прочность. От такого недостатка в значительной степени свободны массивные диэлектрики. Кроме того, массивные диэлектрики позволяют создавать ТЕМЭМС, которые могут работать при повышенных температурах и радиационных воздействиях.

ТЕМЭМС с массивным диэлектриком могут быть выполнены с деформируемым и недеформируемым диэлектриком. Деформируемый диэлектрик можно деформировать в процессе изготовления или

работы системы. Характерным примером деформируемого диэлектрика может быть полиимидная пленка. Преимущество применения деформируемого диэлектрика заключается в возможности реализации конструктивно-технологических решений ТЕМЭС со сложной формой электродов, позволяющих, например, увеличить емкость конденсаторов, а также получить наиболее эффективные виды функциональных зависимостей емкостей от информативных параметров. Соответственно недеформируемый диэлектрик в процессе изготовления и работы системы не подвергается существенным деформациям. Примером недеформируемого диэлектрика может быть керамика.

Границу между деформируемыми и недеформируемыми диэлектриками ТЕМЭС можно провести по значению отношения допустимых деформаций к толщине диэлектрика. Если допустимые деформации диэлектрика превышают его толщину, то такой диэлектрик можно отнести к деформируемым. Соответственно в случае, если допустимые деформации диэлектрика меньше его толщины, то такой диэлектрик целесообразно относить к недеформируемым.

В настоящее время наиболее отработано применение ТЕМЭС в качестве чувствительных элементов тонкопленочных емкостных датчиков давления (ТЕДД). Как было показано ранее на примере тонкопленочных тензорезисторных датчиков [10], важную роль при исследовании поведения датчиков при воздействии внешних воздействующих факторов играет построение обобщенных системных моделей. Так как характеристики ТЕДД существенным образом зависят от характеристик используемых ТЕМЭС, то классификацию датчиков целесообразно проводить в соответствии с применяемыми ТЕМЭС. При рассмотрении ТЕДД с измерительной емкостью как системы, состоящей из подсистем, находящихся под воздействием внешних воздействующих факторов (ВВФ), в результате проведения системного анализа в соответствии с общей методологией, изложенной в [11, 12], построена их обобщенная системная модель, изображенная на рис. 1.

Обобщенная системная модель ТТДД с измерительной емкостью (рис. 1) содержит следующие подсистемы: ПИД — присоединения к измеряемому давлению; ПДП — преобразования давления в перемещение; ОЭИПЭИ — обеспечения электрической изоляции подвижного электрода измерительного конденсатора; ПЭИ — подвижного электрода измерительного конденсатора; ОЭИЭ — обеспечения электрической изоляции электродов, НЭИ — неподвижного электрода измерительного конденсатора; ППЕИ — преобразования перемещения подвижного электрода в емкость измерительного конденсатора; КЭСИ — канализации электрического сигнала измерительного конденсатора; ЭСНИ — электрического сопряжения с надсистемой измерительного конденсатора; ГР... — герметизации и размещения соответствующей подсистемы; ОЭИ... — обеспече-

ния электрической изоляции соответствующей подсистемы. Подсистемы ПДП, ОЭИПЭИ, ПЭИ, ОЭИЭ, НЭИ, ППЕИ, КЭСИ и соответствующие им подсистемы герметизации, размещения и обеспечения электрической изоляции образуют ТЕМЭС. Направление стрелок указывает, как правило, преимущественное направление воздействий, что не исключает определенных воздействий, направленных в противоположном направлении.

Из приведенной на рис. 1 обобщенной системной модели ТЕДД с измерительной емкостью, используемой в ракетной технике, видно, что воздействию нестационарной температуры измеряемой среды $T_{и}$ подвергаются не только подсистемы ПИД, ПДП, ОЭИПЭИ, НЭИ, ППЕИ, но и все другие подсистемы ТЕДД через подсистему ПИД и соответствующие подсистемы герметизации. Воздействию нестационарной температуры окружающей среды подвергаются все подсистемы ТЕДД через соответствующие подсистемы герметизации и размещения. Воздействию виброускорений подвергаются все подсистемы ТЕДД.

Использование результатов экспериментальных исследований и штатной эксплуатации ракетной техники позволило выявить критичные подсистемы ТЕДД, которые определяют общее качество и надежность датчиков при воздействии нестационарных температур и повышенных виброускорений. Такими подсистемами при воздействии температуры измеряемой среды являются: ПИД, ПДП, ОЭИПЭИ, НЭИ, ППЕИ, КЭСИ. Критичными подсистемами при воздействии температуры окружающей среды являются ПДП, ПДП, ОЭИПЭИ, НЭИ, ППЕИ, КЭСИ. При воздействии повышенных виброускорений критичными подсистемами являются ППЕИ, КЭСИ. Таким образом, ТЕДД является проблемосодержащей системой, т. е. системой, в которой возникли проблемы, подлежащие решению. В то же время ТЕДД является проблеморазрешающей системой, т. е. обладающей ресурсами для ликвидации проблемы.

В результате проведения системного анализа в соответствии с общей методологией, изложенной в [11, 12], разработана обобщенная системная модель ТЕДД с измерительной и опорной емкостями, приведенная на рис. 2.

Для минимизации влияния стационарной и нестационарной температуры введены следующие подсистемы: ЭО1 — первого электрода опорного конденсатора; ЭО2 — второго электрода опорного конденсатора; ОЭИЭО — обеспечения электрической изоляции электродов опорного конденсатора; ППЕО — преобразования перемещения электродов в емкость опорного конденсатора; КЭСО — канализации электрического сигнала опорного конденсатора; ЭСНО — электрического сопряжения с надсистемой опорного конденсатора; ГР... — герметизации и размещения соответствующей подсистемы; ОЭИ... — обеспечения электрической изоляции со-

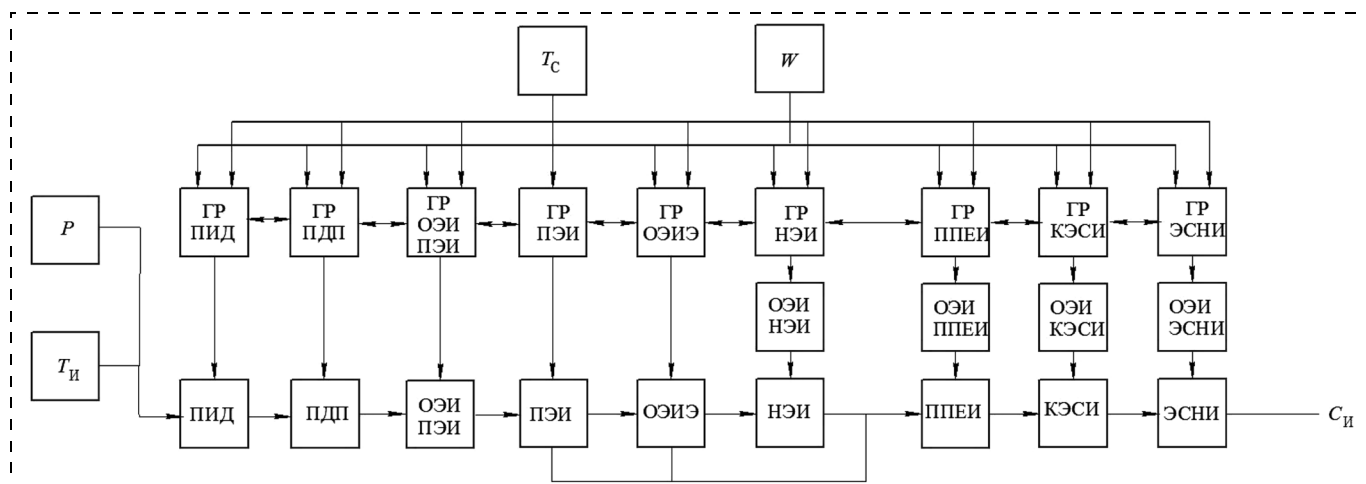


Рис. 1. Обобщенная системная модель ТЕДД с измерительной емкостью при воздействии давления и ВВФ: температуры ($T_{и}$ — температура измеряемой среды, T_c — температура окружающей среды) и виброускорений (W)

ответствующей подсистемы. Подсистемы ПДП, ОЭИПЭИ, ПЭИ, ОЭИЭ, НЭИ, ППЕИ, КЭСИ, ЭО1, ОЭИО, ЭО2, ППЕО, КЭСО и соответствующие им подсистемы герметизации, размещения и обеспечения электрической изоляции образуют ТЕМЭМС ТЕДД с измерительной и опорной емкостями.

Минимизация воздействия виброускорений достигается за счет введения подсистем, аналогичных рассмотренным в [10], и поэтому они не приведены

на изображенной системной модели. Каждая из вышеперечисленных подсистем представляет собой, как правило, сочетание конструктивных (устройства, материалы, размеры, конфигурации, характеристики, их взаимосвязь и т. д.) и технологических (способы изготовления во всем их многообразии) компонентов.

В результате проведения системного анализа в соответствии с общей методологией, изложенной в [11, 12], разработана обобщенная системная модель

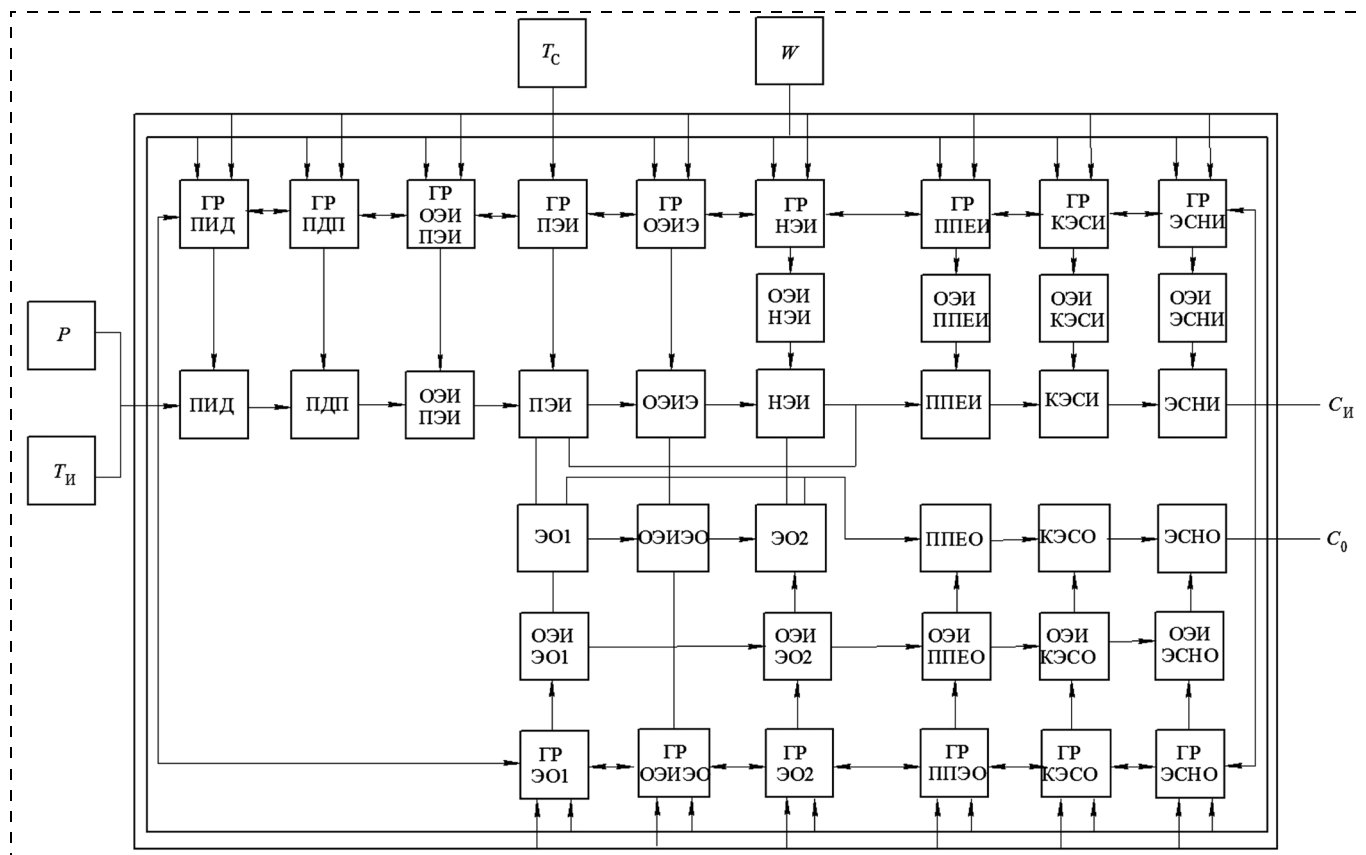


Рис. 2. Обобщенная системная модель ТЕДД с измерительной и опорной емкостями

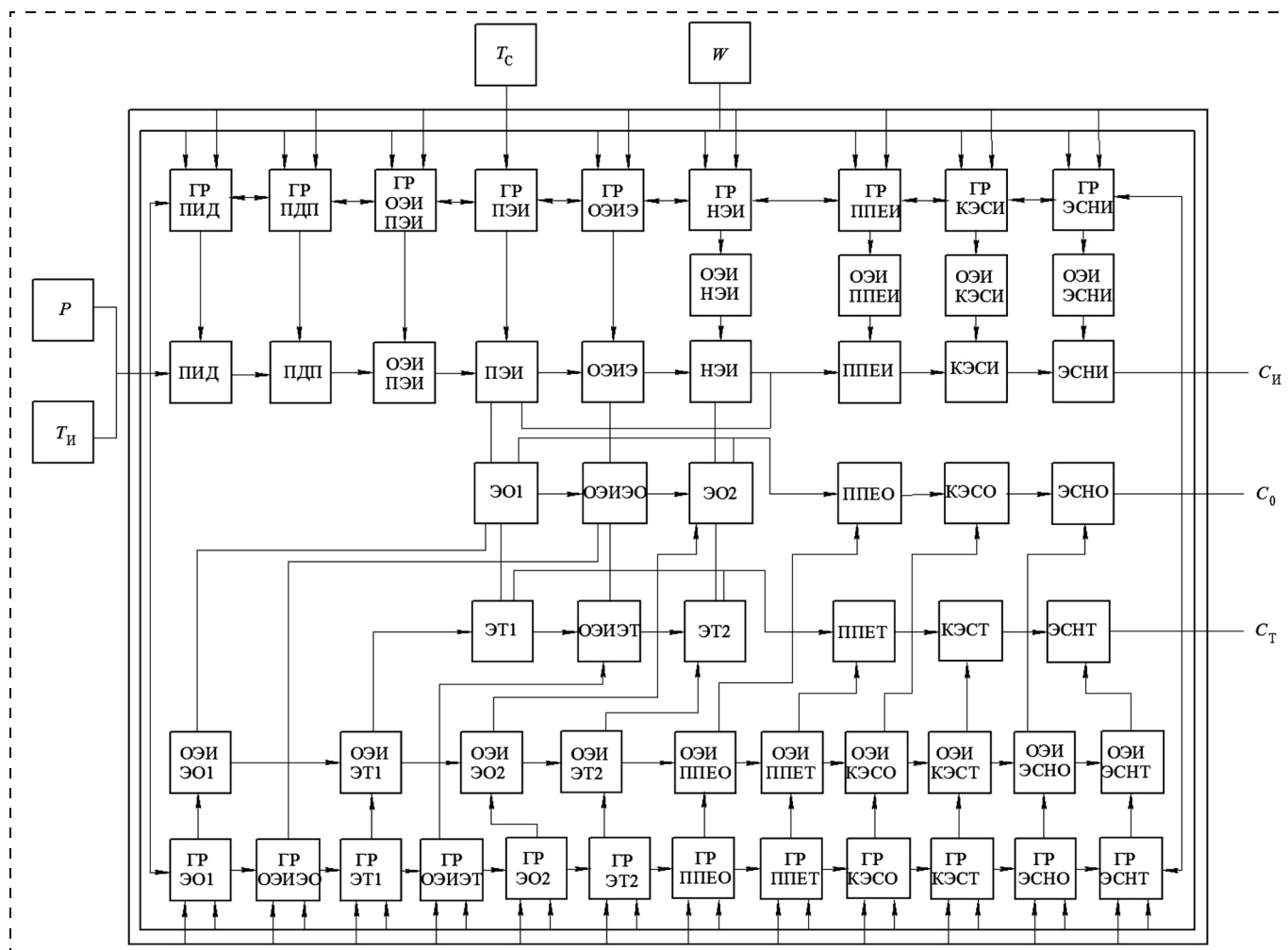


Рис. 3. Обобщенная системная модель ТЕДД с измерительной, опорной и неинформативно-зависимой емкостями

ТЕДД с измерительной, опорной и неинформативно-зависимой емкостями, приведенная на рис. 3. По сравнению с системной моделью ТЕДД, изображенной на рис. 2, в нее введены следующие подсистемы: ЭТ1 — первого электрода неинформативно-зависимого конденсатора; ОЭИЭТ — обеспечения электрической изоляции электродов неинформативно-зависимого конденсатора; ЭТ2 — второго электрода неинформативно-зависимого конденсатора; ППЕТ — преобразования перемещения электродов в емкость неинформативно-зависимого конденсатора; КЭСТ — канализации электрического сигнала неинформативно-зависимого конденсатора; ЭСНТ — электрического сопряжения с надсистемой неинформативно-зависимого конденсатора; ГР... — герметизации и размещения соответствующей подсистемы; ОЭИ... — обеспечения электрической изоляции соответствующей подсистемы. Подсистемы ПДП, ОЭИ-ПЭИ, ПЭИ, ОЭИЭ, НЭИ, ППЕИ, КЭСИ, ЭО1, ОЭИЭО, ЭО2, ППЕО, КЭСО, ЭТ1, ОЭИЭТ, ЭТ2, ППЕТ, КЭСТ и соответствующие им подсистемы герметизации, размещения и обеспечения электрической изоляции образуют ТЕМЭМС ТЕДД с изме-

рительной, опорной и неинформативно-зависимой емкостями.

Для выполнения своих функций неинформативно-зависимая емкость выполняется зависимой от соответствующего воздействующего фактора. Например, для минимизации влияния температуры неинформативно-зависимая емкость выполняется зависимой от температуры, т. е. термозависимой. Для минимизации влияния виброускорений неинформативно-зависимая емкость выполняется зависимой от виброускорений, т. е. виброзависимой. Каждая подсистема представляет собой, как правило, совокупность элементов в их взаимосвязи с другими элементами ТЕДД.

Список литературы

1. Белозубов Е. М., Белозубова Н. Е. Тонкопленочные тензорезисторные датчики давления — изделия нано- и микросистемной техники // Нано- и микросистемная техника. 2007. № 12. С. 49—51.
2. Белозубов Е. М. Патент РФ № 2082125. Датчик давления. Оpubл. 20.06.97. Бюл. № 17.
3. Белозубов Е. М. Патент РФ № 2166741. Датчик давления. Оpubл. 10.05.01. Бюл. № 7.
4. Белозубов Е. М. Патент РФ № 2082124. Датчик давления. Оpubл. 20.06.97. Бюл. № 17.

5. Белозубов Е. М., Жучков А. И. Патент РФ № 2034252. Датчик давления. Оpubл. 30.04.92. Бюл. № 12.
6. Белозубов Е. М. Патент РФ № 2024829. Датчик давления. Оpubл. 15.12.94. Бюл. № 23.
7. Мокров Е. А., Белозубов Е. М., Белозубова Н. Е. Совершенствование датчиков давления методом идентичных тензоэлементов // Мир измерений. 2007. № 8. С. 6—10.
8. Мокров Е. А., Васильев В. А., Белозубов Е. М. Применение термозащитных пленок для минимизации влияния нестационарных температур на тонкопленочные тензорезисторные датчики давления // Датчики и системы. 2005. № 9. С. 21—23.

9. Белозубов Е. М. Патент РФ № 1812459 G01L 9/12. Емкостный датчик давления и способ его изготовления и градуировки. Оpubл. 30.04.93. Бюл. № 16.
10. Мокров Е. А., Белозубов Е. М., Герасимов О. Н. Обобщенная системная модель нового поколения тонкопленочных тензорезисторных датчиков давления // Датчики и системы. 2006. № 6. С. 2—5.
11. Клир Дж. Системология. Автоматизация решения системных задач: Пер. с англ. М.: Радио и связь. 1990. 544 с.
12. Перегудов Ф. И., Тарасенко Ф. П. Введение в системный анализ: Учебн. пос. для вузов. М.: Высш. шк., 1989. 367 с.

УДК 681.586.325

Р. М. Образцов, аспирант,
Южный Федеральный университет, Ростов-на-Дону
E-mail: obraz_r_82@mail.ru

РАЗРАБОТКА И АНАЛИЗ УПРУГИХ ПОДВЕСОВ ДЛЯ ЧУВСТВИТЕЛЬНОГО ЭЛЕМЕНТА МАЛОГАБАРИТНОГО ПЬЕЗОЭЛЕКТРИЧЕСКОГО БИМОРФНОГО ВИБРАЦИОННОГО ГИРОСКОПА

Приводятся результаты конечноэлементного моделирования, проведенного с помощью программного комплекса ANSYS, упругих подвесов, разработанных автором, для чувствительного элемента малогабаритного пьезоэлектрического биморфного вибрационного гироскопа, проводится их анализ; приводятся результаты моделирования двух других известных вариантов подвесов с тем же чувствительным элементом.

Ключевые слова: упругие подвесы, гироскоп, пьезоэлектрическая керамика, биморфная балка.

Чувствительные элементы гироскопов балочного вибрационного типа в отличие от, например микромеханических или камертонных, нуждаются в поддерживающих конструкциях, т. е. в так называемых подвесах, которые являются также и электрическими токоподводами к электродам балки.

Чувствительность гиродатчиков балочного вибрационного типа имеет наибольшее значение при условии равенства собственных резонансных частот колебаний вдоль оси возбуждения и вдоль ортогональной ей оси отклика балки с подвесами, а также при максимальной амплитуде колебаний балки при электрическом ее возбуждении вдоль оси возбуждения, прямо пропорциональной относительным скоростям единиц массы при неизменной частоте, и следовательно, значению силы Кориолиса.

Также упругие подвесы определяют степень устойчивости гироскопа к внешним вибрациям. Таким

образом, чтобы гироскоп не давал сбоев, нижняя собственная частота чувствительного элемента в подвесах должна находиться выше некоторой ранее определенной, в зависимости от условий эксплуатации гироскопа, частоты. Его работоспособность нарушается тогда, когда частота внешней вибрации совпадет с какой-либо собственной частотой выше упомянутой системы. Следовательно, подвесы являются неотъемлемой частью чувствительного элемента гиродатчиков такого типа и влияют на их частотные характеристики.

Чувствительный элемент пьезоэлектрического биморфного вибрационного гироскопа выполнен в виде двух соединенных балок 1 (рис. 1) из пьезоактивного материала, отношение толщины сечения которых к ширине одинаково и равно 1:2. Таким образом, после соединения полученная балка имеет квадратное сечение. Поляризация P пьезоэлементов в такой балке направлена встречно, как показано на рис. 1 стрелками. Electroды на пьезоэлементах представляют собой воженное серебро. Один из электродов (на рисунке — верхний) биморфной балки разделен вдоль пропилом 2 на две одинаковые части 3 для осуществления регистрации угловой скорости. Electroд с противоположной стороны балки используется для возбуждения колебаний. Две части биморфа соединяются клеем либо методом высокотемпературного спекания [1].

Для функционирования такого гироскопа чувствительный элемент возбуждают на первой собственной частоте, при этом возникают гармонические изгибные колебания балки вдоль оси Z . Узлы перемещений и скоростей находятся, согласно рис. 2, а, на

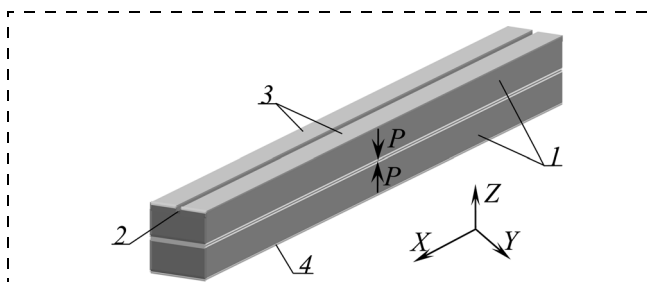


Рис. 1. Чувствительный элемент пьезоэлектрического биморфного вибрационного гироскопа

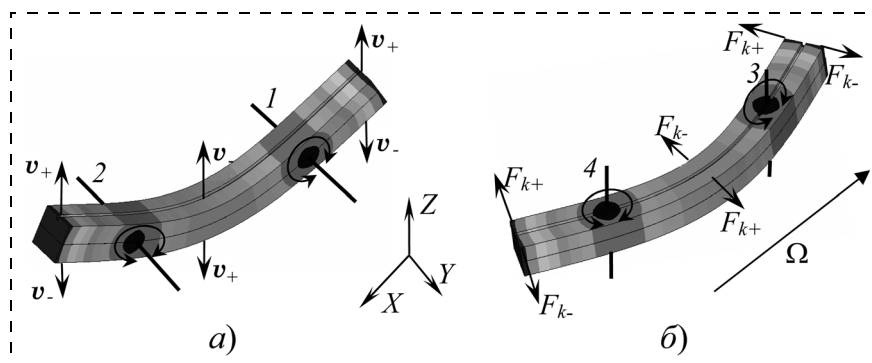


Рис. 2. Моды колебаний биморфной балки:

а — при возбуждении; б — при действии силы Кориолиса

линиях 1 и 2, лежащих в плоскости XY , которые расположены на относительном расстоянии от концов балки, равном 0,22416 всей длины, при колебаниях свободной балки на первой моде. Таким образом, возникает изгиб одной части балки относительно одной из узловых линий и другой части балки относительно второй узловой линии, но в противоположном направлении. При этом получается, что все точки балки движутся с некоторой угловой скоростью, пропорциональной частоте и амплитуде вибрации. Однако ввиду малости амплитуды колебаний балки относительно ее размеров, можно не учитывать этих вращений, а принимать во внимание только линейные скорости точек вдоль оси Z вибрирующей балки, условно обозначенные v_- и v_+ .

Известно, что сила Кориолиса действует на частицы массы, движущиеся с некоторыми линейными скоростями, ортогональными измеряемой угловой скорости. Следовательно, на вибрирующую, как показано на рис. 2, а, балку гироскопа при угловой скорости, параллельной продольной оси балки, Кориолисова сила будет действовать как изображено на рис. 2, б, поскольку в этом случае линейные скорости v_- и v_+ , перпендикулярны измеряемой угловой скорости. Стоит отметить, что показания такого гироскопа не зависят от расстояния до центра вращения, поскольку выражение, определяющее Кориолисову силу, выглядит следующим образом:

$$F_k = 2m[v \times \Omega],$$

где m — единица движущейся массы; v — относительные скорости (v_- или v_+) единицы массы; Ω — переносная угловая скорость.

Действие силы Кориолиса вызывает дополнительный изгиб балки, показанный на рис. 2, б, вдоль оси Y , т. е. ортогонально возбуждающим колебаниям. При этом происходит такое же кручение частей балки, как и при возбуждении, но уже вокруг узловых линий 3 и 4, параллельных оси Z , лежащих в плоскости XZ . Причем, если угловая скорость Ω направлена против оси X , и линейные скорости v_+ и v_- направлены, как на рис. 2, а, то силы Кориолиса F_{k+} и F_{k-} будут иметь направления, как показано на рис. 2, б.

В результате при одновременном действии на балку возбуждающего сигнала и силы Кориолиса

возникает сложный изгиб, при котором части балки, находящиеся под измерительными электродами, деформируются неодинаково. Следовательно, заряд на одном измерительном электроде, генерируемый пьезоэлементом, становится отличным от заряда на втором измерительном электроде, поэтому и сигналы с этих двух электродов становятся отличными друг от друга. Разность фаз этих сигналов тоже становится отличной от нуля. По разностям амплитуд и фаз сигналов с двух измерительных электродов мож-

но судить о значении и направлении угловой скорости.

Как указано выше, чувствительные элементы гироскопов балочного вибрационного типа нуждаются в подвесах. Очевидно, что крепиться к балке они должны в непосредственной близости от узлов колебаний для минимизации воздействия на колебательный режим балочного чувствительного элемента.

На собственные частоты описанной пьезокерамической биморфной балки вдоль осей Z и Y (см. рис. 1) влияют: отношение размеров ее сечения, анизотропия как электрических, так и упругих свойств поляризованной пьезокерамики, параметры разделительного пропила, а также наличие клея. Даже при ничтожно малой толщине клея он влияет на свойства балки, так как его упругие характеристики отличны от аналогичных характеристик пьезокерамики. Очевидно, что на собственные частоты балки с подвесами влияют и параметры последних. Следовательно, при проектировании упругих подвесов необходимо учитывать, что они не только поддерживают балку, но еще и участвуют в определении разности частот чувствительного элемента вдоль оси возбуждения и оси отклика.

Поскольку коэффициент пропорциональности между измеряемой угловой скоростью и значением выходного сигнала в известных датчиках балочного вибрационного типа имеет максимальное значение при условии равенства собственных резонансных частот колебаний вдоль оси возбуждения Z и вдоль ортогональной ей оси отклика Y (см. рис. 1) [2], необходимо обеспечить равенство жесткостей колебательной системы "чувствительный элемент плюс подвесы" в двух взаимно перпендикулярных, указанных выше, направлениях.

Для проектирования упругих подвесов автором создана конечноэлементная модель биморфной пьезоэлектрической балки с характеристиками пьезоматериала ЦТС-47. Длина чувствительного элемента 10 мм, толщина и ширина 1 мм. Размеры балки, выбранные для моделирования, являются характерными для балочных чувствительных элементов малогабаритных вибрационных гироскопов. Глубина и ширина разделительного пропила выбраны произвольно — по 100 мкм. Заложенный в расчеты тип соединения пластин — спекание.

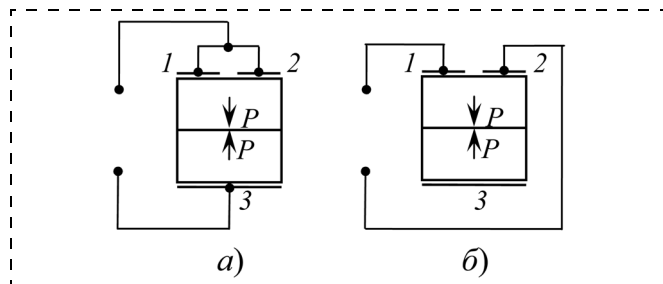


Рис. 3. Схема измерения собственных резонансных частот: а — измерение частоты f_z ; б — измерение частоты f_y

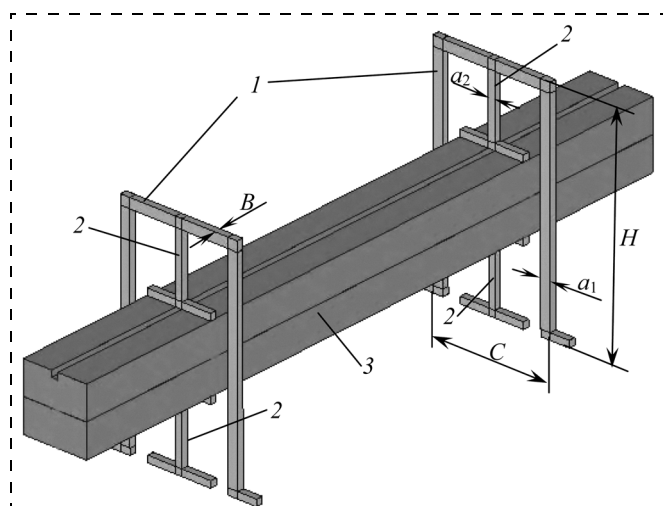


Рис. 4. Биморфная балка с разрабатываемыми упругими подвесами

Проведенный модальный анализ модели описанной пьезоэлектрической биморфной балки в незакрепленном состоянии с соответствующими граничными условиями показал, что она имеет собственные резонансные частоты в двух взаимно ортогональных плоскостях (на этих частотах изгиб балки происходит вдоль осей Z и Y), значения которых $f_z = 29\,370$ Гц, а $f_y = 29\,420$ Гц, соответственно. Разность этих частот, как описано выше, является параметром критичным для эффективного функционирования гироскопа, поэтому разрабатываемые подвесы для этой балки не должны существенно изменять полученную разность частот. Причем, поскольку амплитуда колебаний балки при электрическом ее возбуждении вдоль оси возбуждения (рис. 3, а) прямо пропорциональна линейным скоростям v_+ и v_- (см. рис. 2, а) единиц массы при неизменной частоте и, следовательно, силе Кориолиса F_{k+} и F_{k-} (см. рис. 2, б), подвесы не должны быть слишком жесткими, так как при этом резко падает амплитуда колебаний балки, что отрицательно сказывается на чувствительности гироскопа.

Измерения указанных выше частот организованы по схеме, показанной на рис. 3. Здесь 1 и 2 — электроды, использующиеся для регистрации силы Кориолиса; 3 — электрод для возбуж-

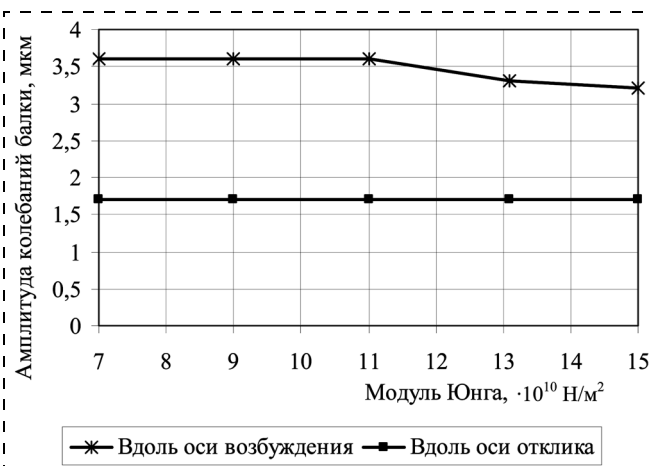


Рис. 5. Зависимость амплитуд колебаний балочного чувствительного элемента с подвесами вдоль осей возбуждения и отклика от значений модуля Юнга материала подвеса

дения чувствительного элемента; P — направление поляризации в биморфной балке.

Предложенные упругие подвесы выполнены в виде двух плоских прямоугольных рамок 1 (рис. 4), внутри которых сформировано по два плоских торсиона 2, закрепленных на балочном чувствительном элементе 3 строго в нулевых плоскостях его колебаний. Такой конструктив подвесов максимально технологичен в изготовлении, так как не требует операций гибки, и вся конструкция изготавливается в одной плоскости.

Серия расчетов позволила получить зависимости амплитуд колебаний балочного чувствительного элемента с описанными выше подвесами вдоль осей возбуждения и отклика от их параметров. При этом амплитуда колебаний балки при электрическом ее возбуждении вдоль оси отклика (см. рис. 3, б) прямо пропорциональна ее податливости при действии Кориолисовой силы и, как следствие, большей деформации балки. Эта механическая деформация вызывает появление электрического заряда на измерительных электродах чувствительного элемента за счет прямого пьезоэффекта. Таким образом, амплитуда колебаний балки при ее возбуждении вдоль оси отклика также является показателем чувствительности гироскопа.

Расчеты проведены со следующими параметрами упругих подвесов, если отдельно не оговорено: $a_1 =$

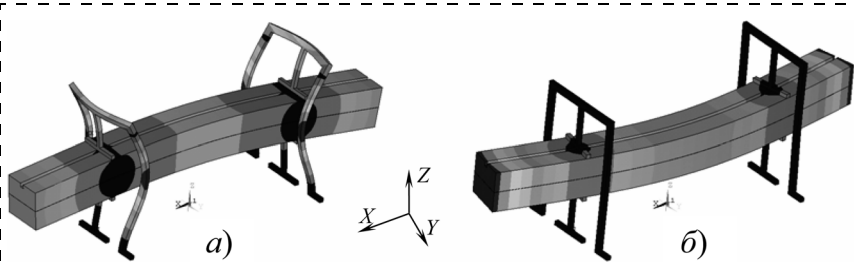


Рис. 6. Моды колебаний модели балочного чувствительного элемента с разрабатываемыми упругими подвесами: а — на частоте f_z ; б — на частоте f_y

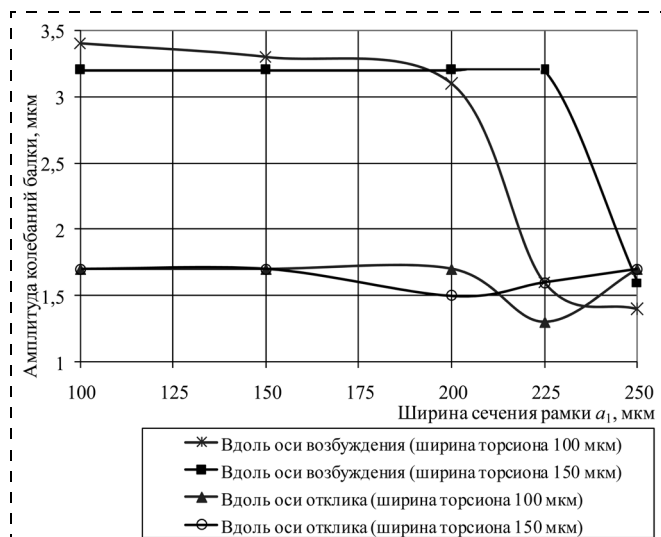


Рис. 7. Зависимость амплитуд колебаний балочного чувствительного элемента с подвесами вдоль оси возбуждения и оси отклика от ширины сечения рамок a_1 при ширине сечения торсионов $a_2 = 100$ мкм и $a_2 = 150$ мкм

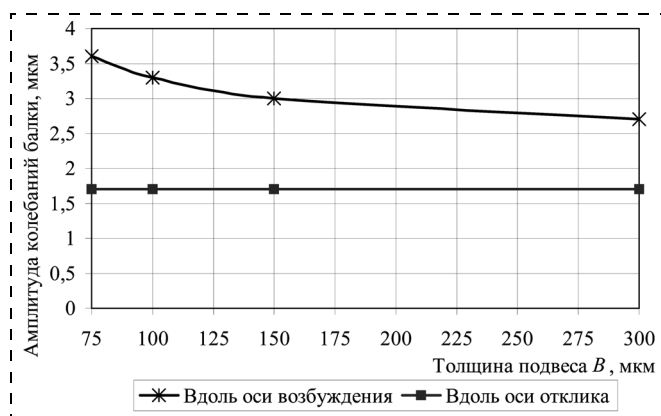


Рис. 8. Зависимость амплитуд колебаний балочного чувствительного элемента с подвесами вдоль оси возбуждения и оси отклика от толщины подвесов B

$= 150$ мкм, $a_2 = 100$ мкм, $B = 100$ мкм, $C = 2100$ мкм, $H = 3400$ мкм (рис. 4).

Из диаграммы на рис. 5 следует, что амплитуда колебаний балки с разрабатываемыми упругими подвесами вдоль оси возбуждения максимальна при модуле Юнга, меньшем $11 \cdot 10^{10}$ Н/м², а на амплитуду колебаний вдоль оси отклика изменение модуля Юнга практически не оказывает влияния, поскольку при этой моде колебаний торсионы подвесов испытывают только деформацию кручения (рис. 6, а), которая существенно меньше зависит от упругости материала, чем изгибная деформация (рис. 6, б). Отсюда следует, что для изготовления таких подвесов рационально использовать материалы со значением модуля упругости менее либо равном $11 \cdot 10^{10}$ Н/м².

Графики на рис. 7 показывают, что амплитуды колебаний чувствительного элемента с подвесами вдоль оси возбуждения и оси отклика практически не зависят от параметров a_1 и a_2 предлагаемых подвесов в пределах значений 100...200 мкм (рис. 7). Это позволяет предъявлять к технологии изготовления

разработанных подвесов менее жесткие требования, что значительно ее удешевляет.

Также моделирование позволило определить, что при прочих равных условиях амплитуда колебаний балочного чувствительного элемента с подвесами вдоль оси возбуждения уменьшается с увеличением толщины B подвеса, а амплитуда колебаний вдоль оси отклика практически неизменна (рис. 8) [3], поскольку при этой моде колебаний, как указывалось выше, торсионы подвесов испытывают только деформацию кручения.

Из графиков на рис. 6—8 видно, что при использовании предложенного подвеса амплитуда колебаний балочного чувствительного элемента вдоль оси отклика практически не зависит от модуля упругости, ширины сечения рамок, торсионов и толщины подвеса, что значительно упрощает технологию изготовления подвеса. Вдоль оси возбуждения амплитуда колебаний чувствительного элемента в некотором диапазоне параметров подвесов тоже мало изменяется, следовательно, используя выше упомянутые диаграммы, можно подобрать максимально эффективную конфигурацию разработанных подвесов и получить наибольшую чувствительность гироскопа, обеспечив одновременно максимальные амплитуды колебаний чувствительного элемента с подвесами как вдоль оси возбуждения, так и вдоль оси отклика.

Для сравнения аналогичные расчеты проведены и для подвеса, разработанного японской фирмой *Murata* для гироскопов серии ENC-03J. Особенность этих подвесов в том, что у них, согласно рис. 9, имеются промежуточные участки (обведены штриховой линией), расположенные в плоскости соединения биморфа (нейтральная плоскость) [4].

По результатам моделирования амплитуда колебаний балочного чувствительного элемента вдоль оси возбуждения составила 3,4 мкм, а вдоль оси отклика — 1,3 мкм. Такая сложная конструкция должна способствовать улучшению устойчивости к внешним механическим воздействиям.

Следующий, рассмотренный для сравнения, вариант упругих подвесов имеет Z-образную форму. Для удобства монтажа балки с подвесами на плату ножки верхних подвесов разнесены от центра балки, а нижних подвесов сведены к центру, как показано

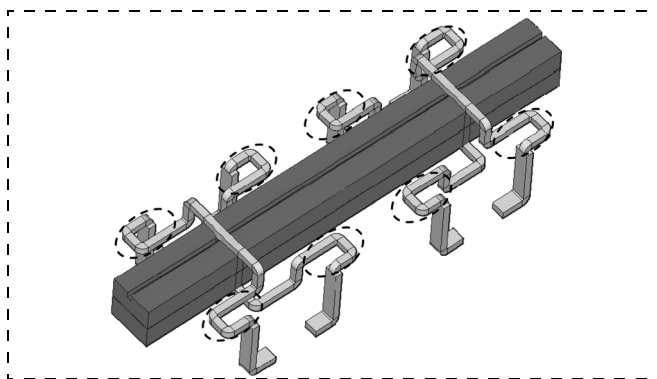


Рис. 9. Биморфная балка с упругими подвесами фирмы *Murata*

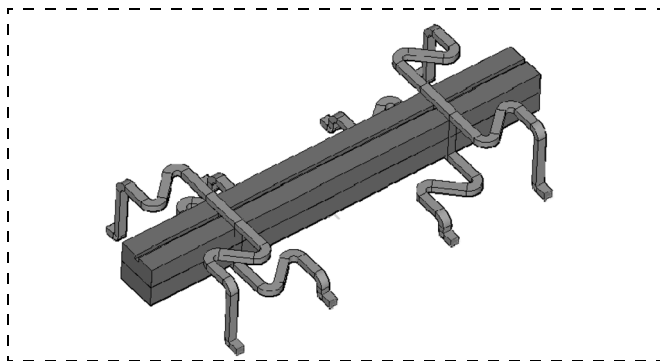


Рис. 10. Биморфная балка с Z-образными упругими подвесами

на рис. 10. Причем частотами f_z и f_y можно управлять, изменяя соотношение размеров и значение площади сечения подвесов, длины ножек, варьируя ширину базы подвесов, значения радиусов изгибов, а также путем подбора материала подвесов.

Моделирование чувствительного элемента с такими подвесами при прочих равных условиях дает следующие результаты: амплитуда колебаний балочного чувствительного элемента вдоль оси возбуждения — 3,2 мкм, а вдоль оси отклика — 1,0 мкм.

Выводы

Результаты конечноэлементного моделирования, проведенного с помощью программного комплекса ANSYS, упругих подвесов, разработанных автором для чувствительного элемента малогабаритного пьезоэлектрического биморфного вибрационного гироскопа, показали высокую их эффективность при оценке чувствительности гироскопа. По результатам моделирования и практическим данным подана патентная заявка на изобретение "Упругий подвес для пьезоэлектрического балочного биморфного вибрационного датчика угловой скорости и способ его монтажа" № 2008107946 от 04.03.2008 г.

Автор выражает благодарность за обсуждение результатов д-ру техн. наук, проф. Распопову Владимиру Яковлевичу и д-ру техн. наук, проф. Паничу Анатолию Евгеньевичу.

Список литературы

1. Образцов Р. М., Шахворостов Д. Ю. Некоторые особенности проектирования пьезокерамического балочного вибрационного гироскопа // Сб. тр. VI международной научно-технической конференции "Инновационные процессы пьезоэлектрического приборостроения и нанотехнологий". Ростов-на-Дону: Изд-во Ростовского государственного педагогического университета, 2008. С. 145—149.
2. Образцов Р. М. Малогабаритный вибрационный гироскоп с балочным биморфным чувствительным элементом из пьезоэлектрической керамики // Нано- и микросистемная техника. 2008. № 10. С. 52—54.
3. Образцов Р. М., Гриценко А. Л., Шахворостов Д. Ю. и др. Патентная заявка № 2008107946 от 04.03.2008 г. Упругий подвес для пьезоэлектрического балочного биморфного вибрационного датчика угловой скорости и способ его монтажа.
4. Патент US 6694813BB. Vibrating gyroscope and electronic unit using the same / Koike Masato, Murata Manufacturing Co., Ltd.

ПРИМЕНЕНИЕ МНСТ

УДК 623.4.023.43

Д. А. Усанов, д-р физ.-мат. наук, проф., зав. каф.,
А. В. Скрипаль, д-р физ.-мат. наук, проф., зав. каф.,
К. С. Авдеев, аспирант,
Саратовский государственный университет
им. Н. Г. Чернышевского
E-mail: UsanovDA@info.sgu.ru

ПРИМЕНЕНИЕ ПОЛУПРОВОДНИКОВОГО ЛАЗЕРНОГО АВТОДИНА С МОДУЛЯЦИЕЙ ДЛИНЫ ВОЛНЫ ИЗЛУЧЕНИЯ ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ РАССТОЯНИЯ ДО ОБЪЕКТА

Приведены результаты моделирования спектра автодинного сигнала частотно-модулированного полупроводникового лазерного измерителя. Описана методика опреде-

ления расстояния до объекта с точностью до 1 % по спектру автодинного сигнала полупроводникового лазерного диода на квантово-размерных структурах с модуляцией длины волны излучения. На основе разработанной методики приведены примеры применения полупроводникового лазерного автодина для определения профиля поверхности.

Ключевые слова: лазерный автодин, модуляция излучения, измерение микропрофиля, автодинный сигнал.

В настоящее время известно применение полупроводниковых лазеров, работающих в автодинном режиме, для контроля динамических характеристик вибраций и перемещений. Как известно, автодинный режим предполагает использование полупроводникового лазера в качестве генератора и приемника электромагнитного излучения одновременно за счет высокого значения коэффициента усиления активной среды к вернувшемуся в резонатор лазера излучению. Такого рода методы контроля имеют высокую чувствительность, устройства на их основе компактны и дешевы. На практике для регистрации

вернувшегося в резонатор лазера излучения используют внешний фотоприемник, встраиваемый в лазерную систему с противоположной стороны резонатора, сигнал же, детектируемый этим фотоприемником, обычно называют автодинным сигналом. Представляет интерес возможность использования полупроводникового лазера, работающего в автодинном режиме, для определения расстояния до точек поверхности объекта в целях дальнейшего восстановления его микрорельефа.

В работах [1–4] была показана связь набега фазы излучения полупроводникового лазера с расстоянием до объекта. Разработанные ранее методики спектрального анализа автодинного сигнала полупроводникового лазера [5] могут быть использованы не только для измерения нановибраций и наноперемещений, но и для определения расстояния до перемещающегося объекта (в пределах изменения набега фазы, равного π). В частности, это возможно в случае, если заранее известно одно какое-либо расстояние, на котором в определенный момент времени находился объект, или известны характеристики специально возбуждаемых вибраций объекта.

То есть для определения расстояния до перемещающегося объекта по указанным выше методикам необходимо сначала либо помещать объект на измеренное независимым методом с высокой точностью расстояние, либо специально приводить объект в состояние вибраций. Например, при измерении нанометровых перемещений для определения набега фазы, характерного для покоящегося объекта, авторами [6] предлагалось использовать метод наложения на объект дополнительных колебаний с известными характеристиками. Однако на практике реализовать колебательное движение объекта, расстояние до которого необходимо определить, не всегда представляется удобным и возможным. Поэтому представляет интерес возможность замены необходимой для определения расстояния до объекта по набегу фазы вибрации отражателя с известными характеристиками периодической модуляцией длины волны излучения полупроводникового лазера, которая, в свою очередь, может быть достигнута, например, токовой модуляцией лазера. При этом измерение расстояния до объекта в нескольких точках при известном смещении лазера по горизонтали позволит решать задачи восстановления сложного рельефа его поверхности.

В связи с этим целью настоящей работы явилась разработка методики определения профиля поверхности объекта с использованием полупроводникового лазерного диода, работающего в автодинном режиме, с дополнительной модуляцией частоты (длины волны) излучения.

В автодинной системе в режиме стационарной генерации, когда изменения в системе происходят за времена, значительно превышающие период колебаний электромагнитного излучения, мощность излучения полупроводникового лазера может быть определена в результате использования малосигналь-

ного анализа скоростных уравнений (для комплексного электрического поля с запаздывающим аргументом и концентрации носителей заряда) в виде зависимости от тока накачки (амплитудная составляющая) и фазового набега (фазовая составляющая) [5]:

$$P(j(t)) = P_1(j(t)) + P_2(j(t))\cos\{\omega(j(t))\tau\}, \quad (1)$$

где $\omega\tau$ — фазовый набег в системе с внешним отражателем; τ — время обхода лазерным излучением расстояния до внешнего отражателя; $\omega(j(t))$ — круговая частота излучения полупроводникового лазера, зависящая от тока накачки j и уровня обратной связи. В предположении слабой обратной связи [7] при использовании токовой модуляции частоты излучения полупроводникового лазера с частотой модуляции тока питания лазерного диода Ω круговая частота излучения полупроводникового лазера в автодинном режиме определится соотношением

$$\omega(j(t)) = \omega_0 + \omega_A \sin(\Omega t + \varepsilon), \quad (2)$$

где ω_0 — круговая частота излучения полупроводникового уединенного лазерного диода; ω_A — амплитуда (глубина) модуляции круговой частоты излучения полупроводникового лазерного диода; Ω — круговая частота модуляции тока питания лазерного диода.

При использовании токовой модуляции частоты излучения полупроводникового лазера будут также изменяться амплитудные составляющие излучения полупроводникового лазера:

$$P_1(j(t)) = I_1 \sin(\Omega t + \varepsilon), \quad P_2(j(t)) = I_2 \sin(\Omega t + \varepsilon). \quad (3)$$

С учетом соотношений для амплитудной (3) и фазовой (2) компонент при изменении тока питания лазера соотношение для мощности излучения полупроводникового лазера переписывается в виде

$$P(t) = I_1 \sin(\Omega t + \varepsilon) + I_2 \sin(\Omega t + \varepsilon) \cos(\omega_0 \tau + \omega_A \tau \sin(\Omega t + \varepsilon)). \quad (4)$$

Обозначая θ величину $\omega_0 \tau$, а σ величину $\omega_A \tau$, выражение для $P(t)$ может быть представлено в виде разложения в ряд по функциям Бесселя:

$$\begin{aligned} P(t) = & (I_1 \sin \varepsilon + I_2 \cos \theta J_0(\sigma) \sin(\varepsilon) - \\ & - I_2 \cos \theta J_2(\sigma) \sin \varepsilon) \cos(\Omega t) + \\ & + (I_1 \cos \varepsilon + I_2 \cos \theta J_0(\sigma) \cos \varepsilon - I_2 \cos \theta J_2(\sigma) \cos \varepsilon \sin(\Omega t) + \\ & + (\sin(\theta) I_2) \cos(2n\Omega t) + \\ & + (\sin(\theta) I_2 \sum_{n=1}^{\infty} (J_{2n+1} - J_{2n-1}) \sin(2n\varepsilon)) \sin(2n\Omega t) + \\ & + (\cos(\theta) I_2 \sum_{n=1}^{\infty} (J_{2n} - J_{2n+2}) \sin((2n+1)\varepsilon)) \cos((2n-1)\Omega t) + \\ & + (\cos(\theta) I_2 \sum_{n=1}^{\infty} (J_{2n} - J_{2n+2}) \cos((2n+1)\varepsilon)) \sin((2n+1)\Omega t), \end{aligned} \quad (5)$$

где $\theta = \omega_0 \tau$, $\sigma = \omega_A \tau$, J_n — функция Бесселя первого рода порядка n .

Используя разложение $P(t)$ в ряд Фурье

$$P(t) = 1/2a_0 + \sum_{n=1}^{\infty} (a_{2n}\cos(2n\Omega t) - b_{2n}\sin(2n\Omega t)) + \sum_{n=1}^{\infty} (a_{2n-1}\cos((2n-1)\Omega t) - b_{2n-1}\sin((2n-1)\Omega t)),$$

можно получить следующие выражения для коэффициентов:

$$\begin{aligned} a_1 &= I_1\sin(\varepsilon) + I_2\cos(\theta)J_0(\sigma)\sin(\varepsilon) - \\ &\quad - I_2\cos(\theta)J_2(\sigma)\sin(\varepsilon); \\ b_1 &= I_1\cos(\varepsilon) + I_2\cos(\theta)J_0(\sigma)\cos(\varepsilon) - \\ &\quad - I_2\cos(\theta)J_2(\sigma)\cos(\varepsilon); \end{aligned}$$

$$a_{2n} = \sin(\theta)I_2 \sum_{n=1}^{\infty} (J_{2n-1} - J_{2n+1})\cos(2n\varepsilon);$$

$$b_{2n} = \sin(\theta)I_2 \sum_{n=1}^{\infty} (J_{2n+1} - J_{2n-1})\sin(2n\varepsilon);$$

$$a_{2n+1} = \cos(\theta)I_2 \sum_{n=1}^{\infty} (J_{2n} - J_{2n+2})\sin((2n+1)\varepsilon);$$

$$b_{2n+1} = \cos(\theta)I_2 \sum_{n=1}^{\infty} (J_{2n} - J_{2n+2})\cos((2n+1)\varepsilon).$$

Вводя коэффициенты C_1, C_2, C_3, C_4 , равные по модулю четным и нечетным спектральным составляющим сигнала и определяемые как

$$C_{2n} = \sqrt{a_{2n}^2 + b_{2n}^2};$$

$$C_{2n+1} = \sqrt{a_{2n+1}^2 + b_{2n+1}^2},$$

можно получить их значения в виде

$$C_1 = \cos(\theta)I_2(J_0(\sigma) - J_2(\sigma)) + I_1;$$

$$C_2 = \sin(\theta)I_2(J_1(\sigma) - J_3(\sigma));$$

$$C_3 = \cos(\theta)I_2(J_2(\sigma) - J_4(\sigma));$$

$$C_4 = \sin(\theta)I_2(J_3(\sigma) - J_5(\sigma)).$$

Для определения неизвестной величины σ можно использовать отношение четных спектральных составляющих автодинного сигнала:

$$C_2/C_4 = (J_1(\sigma) - J_3(\sigma))/(J_3(\sigma) - J_5(\sigma)). \quad (6)$$

Для разработки методики определения расстояния до объекта $l = ct/2$ (где c — скорость света) было проведено численное моделирование предложенного метода с помощью частотно-модулированного полупроводникового лазерного автодина при условии $I_1 = I_2 = 1$ (так как от ношения C_2/C_4 не зависит от соотношений между I_1 и I_2) и следующих параметрах: длина волны лазерного излучения $\lambda = 650$ нм; глубина модуляции круговой частоты излучения полупроводникового лазерного диода $\omega_A = 4,5 \cdot 10^9$, где значение глубины модуляции ω_A выражается в радианах в секунду и представляет собой изменение круговой частоты (длины волны) при гармониче-

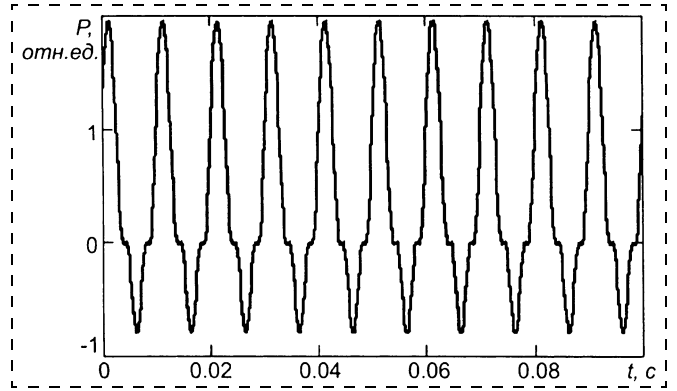


Рис. 1. Зависимость мощности излучения лазерного диода от времени при моделировании

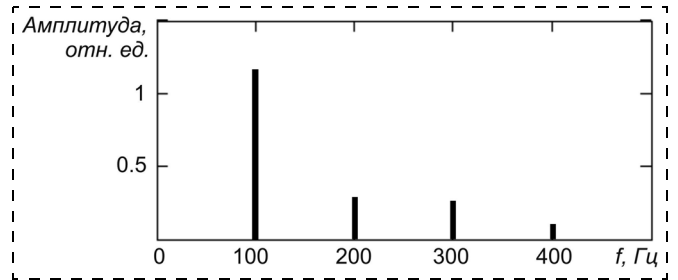


Рис. 2. Спектр автодинного сигнала, приведенного на рис. 1

ском изменении части тока питания лазерного диода.

На рис. 1 приведена зависимость мощности излучения частотно-модулированного лазерного диода от времени, а на рис. 2 соответствующий спектр. Как видно из рис. 2, в спектре автодинного сигнала наблюдаются четыре гармоники, амплитуды которых составляют $C_1 = 1,155$; $C_2 = 0,280$; $C_3 = 0,250$; $C_4 = 0,090$.

Решение уравнения (6) при наличии в спектре автодинного сигнала второй и четвертой спектральных составляющих позволяет определить значение неизвестной величины σ и, следовательно, расстояние до объекта l , при этом относительная погрешность определения произведения $\omega_A \tau$ не превышает 1 %.

Использование частотно-модулированного полупроводникового лазерного автодина для высокоточного определения расстояния до объекта позволяет рассмотреть возможность его применения в качестве измерителя профиля поверхности.

Измерения проводились на установке, в состав которой входил частотно-модулированный полупроводниковый лазер, его излучение направлялось на матовую поверхность исследуемого объекта, при этом диаметр пятна лазерного излучения на поверхности объекта составлял 1 мм. Отраженное излучение направлялось обратно в резонатор лазера, изменение мощности которого фиксировалось фотоприемником, расположенным с обратной стороны резонатора. Продетектированный и усиленный сигнал с фотоприемника, получивший название автодинного сигнала внешнего детектирования [5], поступал на

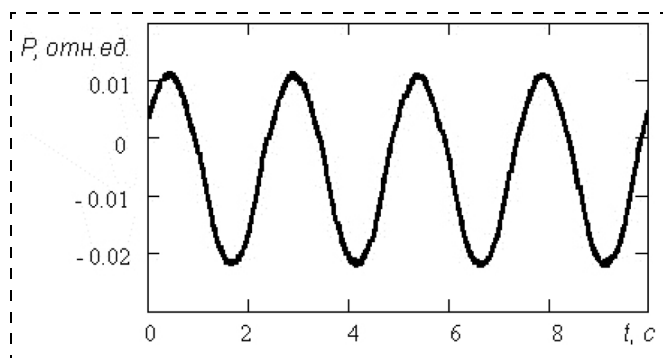


Рис. 3. Экспериментальная зависимость автодинного сигнала лазерного диода от времени при измерении расстояния до поверхности объекта

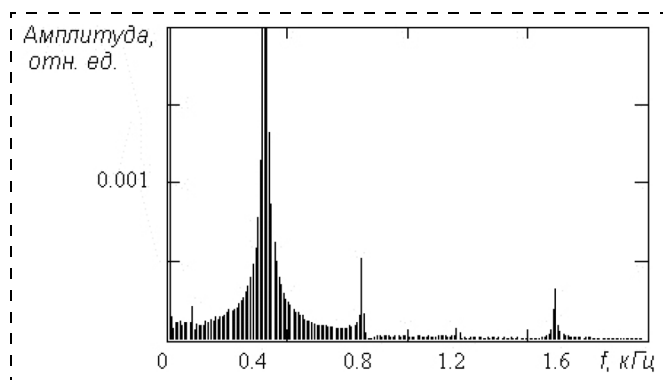


Рис. 4. Спектр автодинного сигнала, приведенного на рис. 3

вход аналого-цифрового преобразователя. По полученному виду автодинного сигнала (рис. 3), который может быть как положительной, так и отрицательной величиной, вследствие того, что протектированный фотоприемником сигнал пропорционален мощности излучения лазера, и для повышения чувствительности системы к возвращенной части отраженного излучения, мы рассматривали только переменную составляющую автодинного сигнала, а именно изменение мощности излучения лазера, строился его спектр (рис. 4) и по отношению второй и четвертой спектральных составляющих автодинного сигнала из соотношения (6) определялось расстояние до точки поверхности объекта. Модуляция длины волны излучения проводилась на частоте $\Omega = 400$ Гц посредством модуляции тока питания лазера с помощью низкочастотного генератора сигналов. Изменение тока питания лазерного диода мы осуществляли путем изменения напряжения питания, подаваемого на полупроводниковую структуру. Нами экспериментально было установлено, что для эффективной модуляции тока питания лазерного диода амплитуда модулирующего сигнала должна быть около 40 мВ. Заметим, что режим работы лазерного диода выбирается по схеме с постоянным током питания, однако на практике для модуляции используется генератор напряжения, подключенный к лазерному диоду через нагрузочное сопротивление.

Перед непосредственным измерением расстояния до объекта было проведено калибровочное измерение, включающее экспериментальное определение глубины модуляции ω_A , при которой длина волны лазерного излучения изменяется на значение, достаточное для формирования полученного в расчетах вида автодинного сигнала и соответствующего низкочастотного спектра. При использовании результатов измерения спектра излучения лазерного диода глубина модуляции может быть определена непосредственно из этих измерений, и при постоянном значении токовой модуляции измерения не требуют новой калибровки до тех пор, пока не будет изменена амплитуда модулирующего лазерный диод напряжения. По известному калибровочному расстоянию $l \approx 10$ см, используя отношение второй и четвертой спектральных составляющих автодинного сигнала, из соотношения (6) определена глубина модуляции круговой частоты излучения лазерного диода $\omega_A = 4,5 \cdot 10^9$, которая в дальнейшем использована для определения неизвестных расстояний до исследуемого объекта. При этом погрешность определения калибровочного расстояния является систематической ошибкой и не влияет на измерение относительных величин рельефа поверхности исследуемого объекта.

В качестве исследуемого объекта использовали деталь "ступенчатый фланец", изготовленную с точностью 0,1 мм на токарном станке, высота каждой

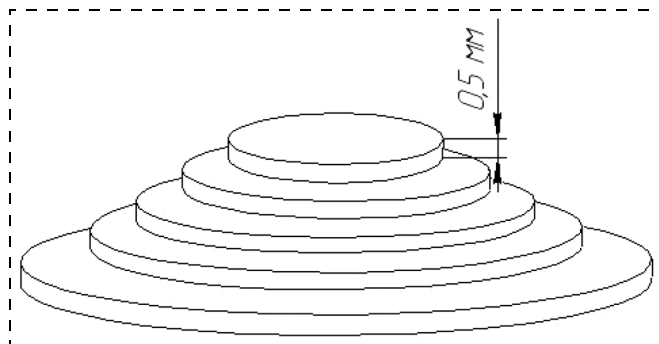


Рис. 5. Исследуемый объект — "ступенчатый фланец". Высота каждой ступени составляет 0,5 мм (точность по паспорту — 0,1 мм)

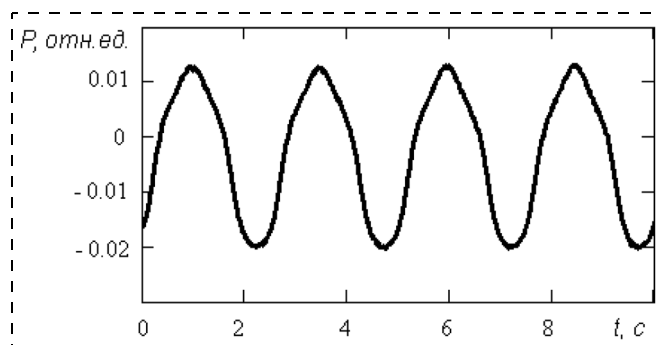


Рис. 6. Зависимость мощности излучения лазерного диода от времени при калибровочном измерении

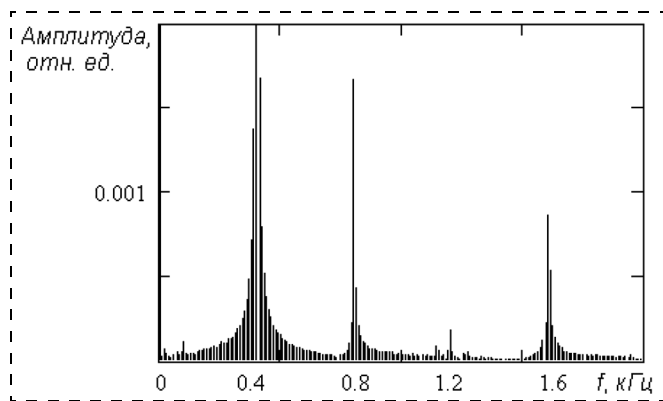


Рис. 7. Спектр автодинного сигнала, приведенного на рис. 6

ступени которого составляла 0,5 мм (рис. 5). При измерении профиля поверхности исследуемого объекта строился спектр (рис. 7) автодинного сигнала (рис. 6), а из соотношения амплитуд второй и четвертой спектральных составляющих, решая уравнение (6), определяли величину $\sigma = \omega_{\Delta t}$. По определенному ранее значению глубины модуляции круговой частоты излучения лазерного диода ω_{Δ} находилось время обхода лазерным излучением расстояния до внешнего отражателя, а следовательно и расстояние до объекта l .

В дальнейшем при перемещении излучателя в горизонтальной плоскости последовательно были определены расстояния еще до четырех точек, в каждой из которых измерения проводились по несколько раз. В таблице представлены результаты измерений расстояний до точек поверхности детали предложенным методом и высота ступеней фланца. Значения высот ступеней фланца имеют точность 0,1 мм, определяемую паспортными значениями их изготовления на станке ИЖ — 250ИТ.

Сравнение с некоторыми промышленными приборами показывает очевидные преимущества лазерных автодинных измерителей. В частности, промышленные приборы не позволяют проводить измерений на расстояниях, меньших 5 см, при этом погрешность достигает 1 мм. Предлагаемый нами метод и устройство, как следует из теоретического

Результаты измерений расстояния до исследуемых точек объекта при перемещении лазера в горизонтальной плоскости

Частота модуляции, Гц	Высота ступеней фланца, мм	Усредненное значение измеренного расстояния, м
400	0,5	0,100435
400	1,0	0,10097
400	1,5	0,10148
400	2,0	0,10203

анализа, может обеспечить измерение расстояний до 10 мм с точностью не хуже 10 мкм. Полученная нами меньшая точность (до 65 мкм) обусловлена зависимостью погрешности определения расстояния до объекта в автодинной системе от уровня обратной связи. С ростом уровня внешней оптической обратной связи погрешность определения расстояния до объекта, полученного из соотношения (6) в приближении слабой обратной связи, растет в связи с искажением формы переменной составляющей автодинного сигнала. С уменьшением уровня обратной связи в измерительной автодинной системе уменьшается уровень полезного сигнала относительно шумов в измерительной системе. Улучшение отношения сигнал/шум при уменьшении уровня обратной связи позволяет повысить точность измерений расстояний в автодинной измерительной системе.

Таким образом, в работе описана и теоретически обоснована методика измерения расстояния с помощью токовой модуляции частоты излучения полупроводникового лазера, работающего в автодинном режиме. На основе этой методики проведены измерения профиля поверхности объекта, находящегося от измерителя на расстоянии, большем 10 см, с точностью ~65 мкм. Приведенные результаты показывают возможность применения лазерного автодина, работающего в режиме модуляции тока питания, в качестве бесконтактного измерителя микропрофиля поверхности. Предложенный измеритель может быть использован для исследования динамики элементов микросистемной техники.

Список литературы

1. Donati S., Giuliani G., Merlo S. Laser diode feedback interferometer for measurements of displacements without ambiguity // IEEE J. Quantum Electron. 1995. Vol. 31. N 1. P. 113—119.
2. Pernick B. J. Self-Consistent and Direct Reading Laser Homodyne Measurement Technique // Appl. Opt. 1973. Vol. 12. № 3. P. 607—610.
3. Sudarshanam V. S., Srinivasan K. Linear readout of dynamic phase change in a fiber-optic homodyne interferometer // Opt. Lett. 1989. Vol. 14. № 2. P. 140—142.
4. Усанов Д. А., Скрипаль А. В. Измерение нанометровых вибраций полупроводниковым лазером на квантоворазмерных структурах, работающим в автодинном режиме // Письма в ЖТФ. 2003. № 9. С. 51—57.
5. Усанов Д. А., Скрипаль Ал. В., Скрипаль Ан. В. Физика полупроводниковых радиочастотных и оптических автодинов — Саратов: Изд-во Сарат. ун-та, 2003. 312 с.
6. Усанов Д. А., Скрипаль А. В., Камышанский А. С. Измерение скорости нанометровых перемещений по спектру автодинного сигнала лазера на квантово-размерных структурах // Письма в ЖТФ. 2004. № 7. С. 77—82.
7. Olesen H., Osmundsen J. H., Tromborg B. Nonlinear dynamics and spectral behavior for an external cavity laser // IEEE J. Quantum Electron. 1986. Vol. 22. P. 762—773.

УДК 669.295:669.693

Ю. Р. Колобов¹, д-р физ.-мат. наук, директор,
О. А. Дручинина², канд. физ.-мат. наук,
ст. науч. сотр.,
М. Б. Иванов¹, канд. физ.-мат. наук, зав. лаб.,
В. В. Сирота², канд. физ.-мат. наук, зам. директора,
М. А. Лазебная¹, науч. сотр.,
Г. В. Храмов¹, инж., **Я. В. Трусова**¹, лаборант,
Н. С. Сергеева³, д-р биол. наук, зав. отделением,
И. К. Свиридова³, канд. биол. наук, ст. науч. сотр.,

¹ Научно-образовательный и инновационный центр "Наноструктурные материалы и нанотехнологии"; Белгородский государственный университет
e-mail: kolobov@bsu.edu.ru

² Центр коллективного пользования научным оборудованием "Диагностика структуры и свойств наноматериалов"; Белгородский государственный университет
e-mail: druchinina@bsu.edu.ru

³ ФГУ "Московский научно-исследовательский онкологический институт им. П. А. Герцена Росмедтехнологий"
e-mail: prognos.06@mail.ru

ФОРМИРОВАНИЕ ПОРИСТЫХ КОМБИНИРОВАННЫХ БИОАКТИВНЫХ ПОКРЫТИЙ НА ТИТАНОВЫХ СПЛАВАХ ВТ6 И ВТ16 МЕТОДОМ МИКРОДУГОВОГО ОКСИДИРОВАНИЯ

Представлены результаты исследования методами растровой электронной и сканирующей зондовой микроскопии морфологии поверхности комбинированных биоактивных покрытий, формируемых на титановых сплавах ВТ6 и ВТ16. Для указанных типов материалов, составов электролитов, а также параметров процесса микродуговой обработки исследованы возможности получения покрытий с различной пористостью. В условиях "in vitro" изучены матриксные (для клеток) свойства поверхностей покрытий.

Ключевые слова: титановые сплавы, биосовместимость, гидроксилapatит, кальций-фосфатные покрытия, модифицирование поверхности, микродуговая обработка, комбинированные биоактивные покрытия.

Введение

Титан и его сплавы широко используют в качестве хирургических имплантатов в ортопедии и стоматологии в связи с их высокими механическими свойствами и хорошей биосовместимостью. Однако при лечении заболеваний и дефектов опорно-двигательной системы существует проблема расшатывания элементов аппаратов внешней фиксации, связанная с ухудшением свойств границы кость/имплантат. Для того чтобы увеличить остеоинтеграцию (срастание с костной тканью) имплантатов, титановую поверхность модифицируют, используя, например, нанесение покрытий на основе гидроксилapatита, в том числе легированного различными элементами [1–4]. Данный материал является биоактивным, поскольку способствует образованию связи между живой костью и поверхностью имплантата путем формирования апатитового слоя и стимулирует рост новой костной ткани.

Микродуговое оксидирование (МДО) является одним из наиболее широко используемых методов нанесения покрытий. Данный метод позволяет получать пористые покрытия, при этом размер пор и/или шероховатость поверхности покрытия можно контролировать регулированием параметров технологического процесса [5, 6]. Нанесение кальций-фосфатных (Са–Р) покрытий проводится в процессе микродуговой обработки поверхности материала с добавлением в электролит кальцийсодержащих соединений [7]. Формирование покрытий при микродуговом разряде связано с протеканием высокотемпературных химических превращений в зоне локальных микроплазменных (микродуговых) разрядов и происходит за счет окисления основного материала, а также переноса в покрытие ультрадисперсной фазы, находящейся в электролите [8].

Данный метод, сочетающий электрохимическое окисление поверхности металла с разрядными явлениями в электролите, является достаточно сложным многофакторным процессом и зависит как от индивидуальных факторов (состав электролита и окисляемого сплава, токовый режим и т. п.), так и от их совокупности.

Целью настоящей работы являлось изучение особенностей процесса получения комбинированных покрытий на титановых сплавах ВТ6 и ВТ16 и исследование их структуры и свойств.

Материалы и методики эксперимента

Микродуговое оксидирование (МДО). Для нанесения покрытий методом микродугового оксидирования использовали пластины ($5 \times 5 \times 1,5$ мм), вырезанные из объемных заготовок титановых сплавов ВТ6 и ВТ16 с ультрамелкозернистой структурой, сформированной методом всесторонней деформации [9]. Элементный состав сплавов приведен в табл. 1.

Для всех образцов проводили предварительную механическую обработку поверхности с последующей очисткой в растворе технического моющего средства для металлов "Вега-Р". Формирование кальций-фосфатных покрытий в процессе микродуговой обработки осуществлялось в щелочном и кислотном электролитах с добавлением наногидроксипатита. Электролит для обработки титанового сплава ВТ6 был приготовлен на основе 2 %-ного водного раствора гидроксида калия (КОН) и водного 0,5 %-го коллоидного раствора наноструктурного гидроксипатита, полученного по оригинальной технологии [10]. Для обработки сплава ВТ16 состав электролита был изменен и включал в себя 1 %-ный водный раствор ортофосфорной кислоты (H_3PO_4) и водный 2,3 %-ный коллоидный раствор наногидроксипатита.

Для получения покрытий использовалась разработанная в ИФПМ СО РАН (г. Томск) установка микродугового оксидирования "MicroArc-2", позволяющая в широком интервале варьировать и регистрировать основные параметры технологического процесса. Основными контролируемыми параметрами, определяющими процесс формирования покрытия, являлись длительность анодного и катодного

импульсов, их амплитуда, частота следования импульсов, длительность процесса нанесения покрытия (табл. 2).

Процесс нанесения покрытия проводили в термостатируемой ванне при принудительном перемешивании электролита. После микродуговой обработки образцы промывали в дистиллированной воде, высушивали на воздухе и затем отжигали в муфельной печи при температуре 873 К в течение 1 ч.

Исследование микроструктуры и рельефа микродуговых покрытий. Исследования микроструктуры и элементного состава полученных микродуговых кальций-фосфатных покрытий проводили на растровом ионно-электронном микроскопе Quanta 2003D, оснащенный приставкой для энергодисперсионного анализа. Изучение рельефа поверхности проводили на сканирующем зондовом микроскопе "NanoEducator".

Исследования "in vitro" образцов из титановых сплавов ВТ6 и ВТ16 с комбинированными биоактивными покрытиями. Оценка острой цитотоксичности и матричных (для клеток) свойств экспериментальных образцов титановых сплавов с биоактивными покрытиями была выполнена на модели иммортализованных фибробластов человека с помощью МТТ-теста [11]. Данный фрагмент работы выполнен в ФГУ "МНИОИ им. П. А. Герцена Росмедтехнологий". Исследование проводилось в несколько этапов.

На первом этапе токсичность в отношении перевивной клеточной линии фибробластов человека оценивали через 24 ч совместного культивирования. На следующем этапе скрининговых исследований была определена способность данных материалов

Таблица 1

Химический состав используемых сплавов

Химический состав, % Ti-основа	Al	Mo	V	Zr	Si	Fe	C	O ₂	N ₂
ВТ6	6,46	—	3,84	0,020	0,010	0,083	0,005	0,166	0,003
ВТ16	3,21	5,4	4,42	0,11	0,072	0,11	0,011	0,140	0,016

Таблица 2

Параметры процесса микродуговой обработки титановых сплавов

Параметры процесса МДО	ВТ6	ВТ16
Режим	Гальваностатический	Потенциостатический
Длительность анодного и катодного импульсов, τ^+/τ^-	250 мкс/250 мкс	250 мкс/250 мкс
Амплитудное значение напряжений импульсов	$U_{\max}^+ = 280$ В $U_{\max}^- = 70$ В	$U^+ = 500$ В $U^- = 100$ В
Частота следования импульсов, F	50 Гц	50 Гц
Средний ток (на образец)	$I^+ = I^- = 4$ А	$I_{\max}^+ = 3$ А
Время нанесения	10 мин	7 мин

поддерживать пролиферативную активность фибробластов человека при совместном культивировании (время инкубации — 1, 4, 7, 11, 14, 18, 21, 25 и 28 сут). В качестве контроля использовали параметры роста клеток на полистерене.

Результаты и обсуждение

Результаты исследования микроструктуры кальций-фосфатных покрытий методом растровой электронной микроскопии (РЭМ). Анализ литературных источников показал, что химические составы сплава и электролита, используемого при микродуговом оксидировании, вносят решающий вклад в качество получаемого покрытия [1–5]. Для исключения возможных нежелательных реакций при использовании имплантатов, а также уменьшения токсичности материала при его длительном нахождении в организме необходимо правильно подобрать состав электролита и режимы процесса микродугового оксидирования [1, 5, 7]. На основании результатов предварительно проведенных экспериментов был определен состав электролитов для обработки титановых сплавов ВТ6 и ВТ16.

Было установлено, что при снижении в электролите концентрации щелочи (КОН) ниже 2 % (масс)

в процессе обработки сплава ВТ6 наблюдаются эффекты, связанные с перераспределением токов и различной напряженностью поля вблизи поверхности, большим падением напряжения на электролите и его обеднением вблизи электрода. Все это приводит к неравномерной обработке поверхности образца, особенно при получении покрытий без добавления гидроксилатапатита в электролит (рис. 1, а). Повышение концентрации КОН приводит к увеличению проводимости покрытия в процессе микродуговой обработки. Это ведет к повышению выделяемой мощности и температуры приповерхностной области. В связи с этим наряду с образованием оксидного слоя происходит его активное травление, поэтому он имеет градиентную пористость (рис. 1, б). Таким образом, увеличение толщины покрытия сдерживается процессом травления (для инициирования микроарядов требуется повышение напряжения, а с увеличением тока и выделяющейся теплоты наблюдается увеличение скорости травления). При определенных условиях теплоотвода, составе электролита и электрических параметрах существует баланс скоростей травления и роста, в результате чего толщина покрытия остается неизменной.

Данная особенность использовалась нами для формирования комбинированных кальций-фосфат-

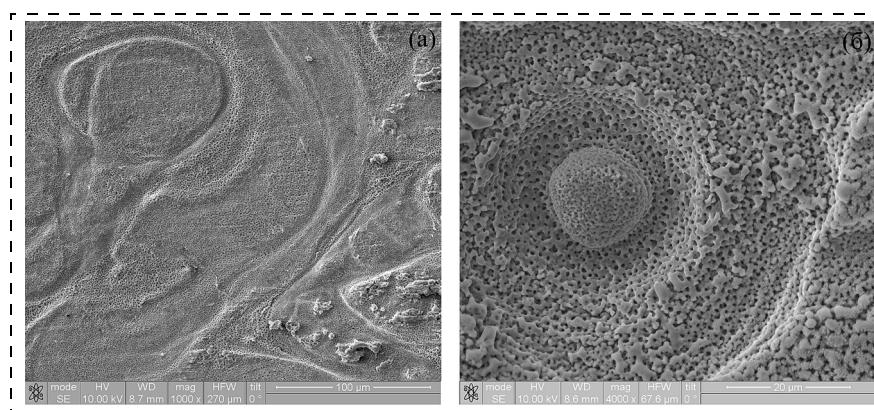


Рис. 1. Оксидный слой на сплаве ВТ6, формирующийся при повышенном травлении подложки и покрытия:

а — макрорельеф $\times 1000$; б — микрорельеф $\times 4000$. Растровая электронная микроскопия

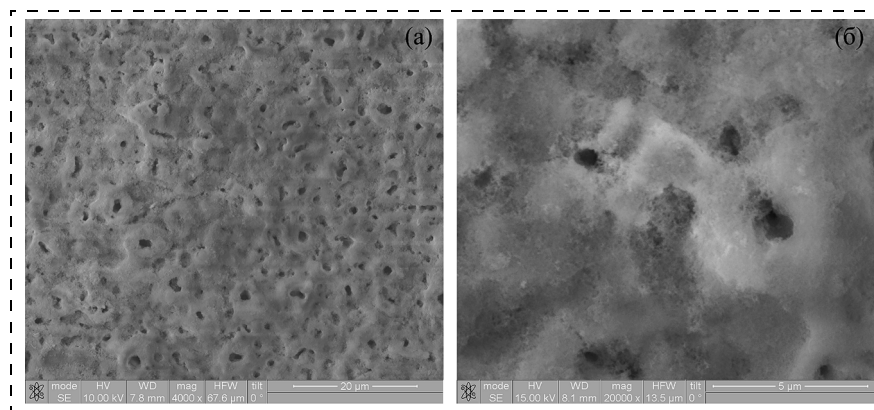


Рис. 2. Формирование комбинированного покрытия на основе гидроксилатапатита на титановом сплаве ВТ6:

а — структура поверхности, увеличение $\times 4000$; б — осадненный на поверхности покрытия гидроксилатапатит, увеличение $\times 20\,000$. Растровая электронная микроскопия

ных покрытий на титановом сплаве ВТ6. В этом случае частицы гидроксилатапатита, внедряемые в покрытие, играют роль выравнивающего агента. Благодаря его электроизолирующим свойствам уменьшаются удельные токи через поверхность, происходит выравнивание потенциала в приэлектродной области и, соответственно, параметров диффузионных, электрохимических и электрофизических процессов. Рельеф поверхности формируется за счет образования пор различного размера (рис. 2, а). После окончания процесса микродуговой обработки на поверхности образцов наблюдается формирование слоя осадненного гидроксилатапатита, не удаляемого при промывке образцов в воде (рис. 2, б).

При исследовании процесса формирования комбинированного кальций-фосфатного покрытия на сплаве ВТ16 в щелочном электролите с добавлением гидроксилатапатита установлено, что оно получается довольно тонким, рыхлым, состоящим в основном из спекшегося гидроксилатапатита. Кроме этого, данное покрытие имеет плохую адгезию к поверхности подложки. По-видимому, это обусловлено тем, что в сплаве ВТ16 помимо незначительного количества алюминия (Al) и ванадия (V) присутствует и мо-

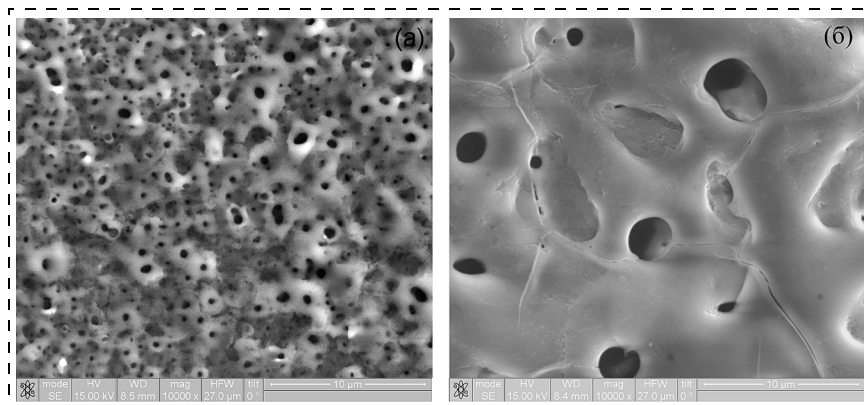


Рис. 3. Влияние анодного напряжения на морфологию поверхности комбинированного покрытия, полученного при обработке титанового сплава BT16 в кислотном электролите с добавлением гидроксилапатита, увеличение $\times 10\,000$:
 а — $U_a = 460$ В; б — $U_a = 540$ В. Растровая электронная микроскопия

либден (Mo), не образующий оксидов при низких температурах. Это значительно увеличивает сквозную проводимость на границе металл—электролит, способствуя локальному повышению температуры и усилению процессов травления титана и его оксидов. В связи с этим для формирования прочного комбинированного покрытия на данном сплаве использовали кислотный электролит.

В сравнении со сплавом BT6, обрабатываемом в щелочном электролите, переход металл—оксид—электролит для сплава BT16 в "кислом" электролите имеет большее сопротивление сквозным токам в процессе оксидирования. Благодаря этому появляется возможность повышения формирующих напряжений.

Качество получаемых на сплаве BT16 покрытий весьма чувствительно к соотношению концентрации ортофосфорной кислоты (H_3PO_4) и гидроксилапатита в электролите, а также параметрам технологического процесса. При взаимодействии ортофосфорной кислоты с гидроксилапатитом образуются кислые формы фосфатов кальция. В зависимости от концентрации кислоты и гидроксилапатита в электролите возможно образование либо дисперсной системы, где в качестве твердой фазы выступают кристаллы брушита — гидрофосфата кальция ($CaHPO_4$), либо прозрачного раствора дигидрофосфата кальция $Ca(H_2PO_4)_2$. В первом случае процесс формирования покрытия затрудняется ввиду уменьшения электропроводности электролита, во втором — приобретает характер обычного микродугового оксидирования в кислоте. Изменение анодного напряжения значительно влияет на морфологию поверхности получаемых комбинированных покрытий (рис. 3).

В целом полученные результаты свидетельствуют о том, что в зависимости от типа материала, состава электролита, а также параметров процесса микродуговой обработки таким методом можно получать покрытия на титановых сплавах BT6 и BT16 с различным размером пор, что очень важно для

процесса остеоинтеграции имплантата с костной тканью.

Результаты исследования поверхности комбинированных покрытий методом сканирующей зондовой микроскопии. В связи с тем, что метод растровой электронной микроскопии не позволяет получать количественную информацию о шероховатости поверхности и глубине пор формируемых покрытий, предпочтительным для этих целей является использование метода сканирующей зондовой микроскопии. Топографию поверхности и шероховатость покрытий в данной работе определяли на сканирующем зондовом микроскопе "Nanoeducator". Измерения проводили на различных участках образцов с кратностью не менее 5 раз.

Исследование поверхности комбинированных покрытий, полученных на титановом сплаве BT6 методом микродуговой обработки, показало, что данное покрытие имеет явно выраженную пористую структуру (рис. 4, а, см. четвертую сторону обложки). При этом глубина пор изменяется от 1,4 до 2 мкм, а средняя шероховатость составляет порядка 560 нм.

Исследование рельефа комбинированных покрытий на основе гидроксилапатита, полученных при микродуговой обработке титанового сплава BT16 в кислом электролите, показало, что данные покрытия имеют хорошо развитый рельеф поверхности и достаточно пористую структуру (рис. 4, б, см. четвертую сторону обложки). Глубина пор изменяется в среднем от 1 до 8,6 мкм. При этом на поверхности крупных пор наблюдаются поры меньшего размера. Средняя шероховатость составляет порядка 1200 нм.

Таким образом, получение комбинированных покрытий при микродуговой обработке титановых сплавов BT6 и BT16 возможно лишь при строго определенных параметрах технологического процесса. При этом размер пор и/или шероховатость поверхности покрытия можно контролировать регулированием параметров технологического процесса.

Результаты исследования "in vitro" лабораторной партии образцов титановых сплавов BT6 и BT16 с биоактивным покрытием. Было установлено, что исследуемые материалы не содержали токсичных компонентов и существенно не влияли на процессы прикрепления, распадаивания клеток по поверхности покрытия и на активность их клеточного метаболизма. И, хотя оптическая плотность раствора формазана была достоверно ниже по сравнению с контрольным раствором на полистерене, однако при этом пул жизнеспособных клеток на этих материалах составлял 85 и более процентов (рис. 5).

Полученные результаты свидетельствуют об отсутствии цитотоксичности титановых сплавов BT6 и BT16 с покрытиями, полученными описанным выше методом.

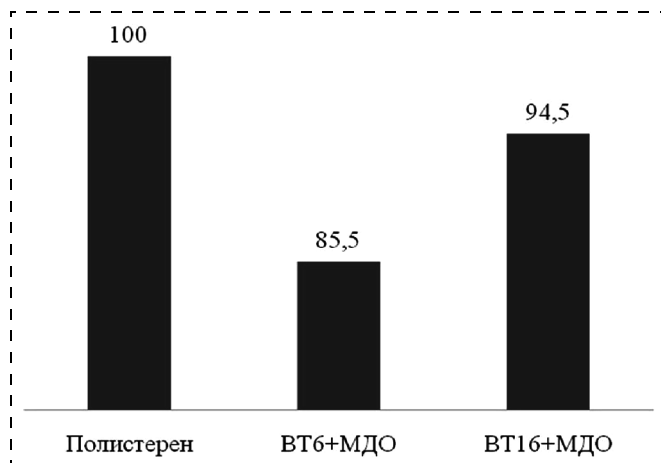


Рис. 5. Пул жизнеспособных фибробластов человека (в % от контроля) через 24 ч культивирования на образцах титановых сплавов с покрытием



Рис. 6. Кривые изменения оптической плотности раствора формазана при культивировании фибробластов человека на полистерене (контроль) и образцах титановых сплавов с покрытием в динамике эксперимента (МТТ-тест)

Было показано, что оптическая плотность раствора формазана, косвенно характеризующая численность клеточной популяции, линейно увеличивалась в первые две недели эксперимента и в опытных группах была достоверно выше контрольных значений на всех сроках эксперимента. Фибробласты человека активно заселяли поверхность с биоактивным покрытием, интенсивно пролиферировали на них в течение всего эксперимента, начиная с четырех суток культивирования. К 18–21 суткам опыта отмечалось снижение пролиферативной активности фибробластов, вероятно, вследствие контактного торможения культуры, с выходом на плато на 25–28 сутки (рис. 6). В период с 14-х по 28-е сутки эксперимента, когда в контроле, вследствие контактного торможения культуры фибробластов, процессы гибели клеток преобладали над их пролиферацией, популяция фибробластов на образцах с биоактивным покрытием продолжала постоянно увеличиваться.

Прирост пула фибробластов в контроле в 1-ю и 2-ю недели практически не различался и составлял 76–83 %. В опытных же группах максимальный прирост 124–203 % популяции фибробластов был отмечен в 1-ю неделю эксперимента, а далее постепенно снижался. Это может свидетельствовать о быстром заселении поверхности исследуемых материалов клетками.

Выводы

Исследованы закономерности формирования пористых комбинированных биоактивных покрытий на титановых сплавах VT6 и VT16 методом микродугового оксидирования. Установлено, что в зависимости от типа материала, состава электролита, а также параметров процесса микродуговой обработки можно получать покрытия с различным размером пор.

Показано, что для комбинированных покрытий, полученных на титановом сплаве VT6, глубину пор удается варьировать в диапазоне от 1,4 до 2 мкм, а средняя шероховатость составляет порядка 560 нм. Для покрытий, сформированных при микродуговой обработке сплава VT16, глубина пор изменяется от 1 до 8,6 мкм. Средняя шероховатость поверхности составляет порядка 1200 нм.

Формирование на поверхности титановых сплавов пористых комбинированных биоактивных покрытий методом микродугового оксидирования придает данным материалам, наряду с выраженными адгезивными для клеток свойствами, способность поддерживать на высоком уровне их пролиферацию. Полученные "in vitro" данные свидетельствуют об удовлетворительных матричных (для клеток) свойствах поверхности исследованных материалов и открывают перспективу их возможного широкого применения в медицинской практике.

Работа выполнена в рамках проектов ФЦП "Разработка технологии создания биосовместимых наноструктурированных функциональных керамических и композиционных материалов для медицины" (гос. контракт № 02.513.11.3160) и "Разработка опытно-промышленных технологий получения нового поколения медицинских имплантатов на основе титановых сплавов" (гос. контракт № 02.523.11.3007) с использованием оборудования Центра коллективного пользования Белгородского госуниверситета.

Список литературы

1. Karlov A. V., Shakhov V. P. and Kolobov Ju. R. Definition of Silver Concentration in Calcium Phosphate Coatings on Titanium Implants Ensuring Balancing of Bactericidity and Cytotoxicity // Key Engineering Materials. 2001. V. 194. P. 207–210.
2. Kolobov Yu. R., Karlov A. V., Sagymbaev E. E., Shashkina G. A., Valiev R. Z. Ceramic Coatings on the High-Strength Titanium as Prospective Material for Orthopaedic Implants // Bioceramics. 2000. V. 13. P. 215–218.

3. **Bangcheng Yang, Masaiki Uchida, Tadashi Kokubo.** Preparation of bioactive titanium metal via anodic oxidation treatment // *Biomaterials*. 2004. V. 25. P. 1003—1010.

4. **Калита В. И., Гнедовец А. Г., Мамаев А. И.** Формирование композиционных пористых покрытий на поверхности имплантатов низкотемпературной плазмой // *Физика и химия обработки материалов*. 2005. № 3. С. 39—47.

5. **Малышев В. Н.** Особенности формирования покрытий методом анодно-катодного микродугового оксидирования // *Защита металлов*. 1996. Т. 32. № 6. С. 662—667.

6. **Суминов И. В.** и др. Микродуговое оксидирование (теория, технология, оборудование). М.: ЭКОМЕТ, 2005. 368 с.

7. **Karlov A. V., Kolobov Yu. R., Busnev L. S., Saguyumbaev E. E., Petrovskaya T. S., Shashkina G. A.** The Calcium-Phosphate Coatings Applied on Titanium by Different

Technology // *Medical & Biological Engineering & Computing*. 1999. V. 37. № 3. P. 198—199.

8. **Булычев С. И., Федоров В. А., Данилевский В. П.** Кинетика формирования покрытий в процессе МДО // *Физика и химия обработки материалов*. 1993. № 6. С. 53—59.

9. **Колобов Ю. Р., Валиев Р. З., Грабовецкая Г. П., Жиглаев А. П., Дударев Е. Ф., Иванов К. В., Иванов М. Б., Кашин О. А., Найденкин Б. В.** Зернограничная диффузия и свойства наноструктурных материалов // Новосибирск: НАУКА, 2001. 232 с.

10. **Заявка на патент РФ № 2007130861.** Способ получения наноразмерного гидроксилатапатита. Н. Н. Волковняк, М. Б. Иванов, Ю. Р. Колобов, А. А. Бузов, В. П. Чув.

11. **Mossman T.** Rapid colorimetric assay for cellular growth and survival: application to proliferation and cytotoxicity assays // *J. Immunol. Methods*. 1983. V. 65. P. 55—63.

ПРЕДСТАВЛЯЕМ НОВЫЕ КНИГИ

НАНОТЕХНОЛОГИИ. НАНОМАТЕРИАЛЫ. НАНОСИСТЕМНАЯ ТЕХНИКА

Мировые достижения — 2008 год

Сборник под редакцией д-ра техн. наук, профессора П. П. Мальцева

Москва: Техносфера, 2008. 432 с., ISBN 978-5-94836-180-2

Данная работа является продолжением серии книг издательства "Техносфера" по мировым достижениям в области нанотехнологий. Книга охватывает материалы, опубликованные в 2006—2008 гг. в журнале "Нано- и микросистемная техника" и сгруппированные по разделам, охватывающим наноматериалы, нанoeлектронику, нанодатчики и наноройства, диагностику наноструктур и наноматериалов, нанобиотехнологию и применение нанотехнологий в медицине. В цветном издании представлены примеры реализации и применения в области технологии формирования наноструктур, методов исследования наноматериалов, метрологическое обеспечение и основы технологии наносистемной техники.

По просьбе читателей в книгу введен новый раздел — АНГЛО-РУССКИЙ ТЕРМИНОЛОГИЧЕСКИЙ СЛОВАРЬ ПО МИКРО- И НАНОСИСТЕМНОЙ ТЕХНИКЕ.

Сборник представляет интерес для ученых, инженеров и преподавателей высшей школы, аспирантов и студентов, специализирующихся в области нанотехнологий, наноматериалов, нанoeлектроники, микро- и наносистемной техники.

Подробная информация о книгах, выпускаемых издательством ТЕХНОСФЕРА на сайте: <http://www.technosphera.ru>. Заявки на книги принимаются по адресу sales@technosphera.ru

КИРЕЕВ В. Ю. ВВЕДЕНИЕ В ТЕХНОЛОГИИ МИКРОЭЛЕКТРОНИКИ И НАНОТЕХНОЛОГИИ 432 с., 36 табл., 70 рис., список литературы 142 ист.

В книге показана история развития электроники и микроэлектроники, приведена эволюция электронно-вычислительных машин (компьютеров), сформулированы требования к основным изделиям микроэлектроники: логическим схемам и схемам памяти.

Сформулированы требования по основным параметрам к производственным помещениям, исходным

кремниевым пластинам, к жидким и газообразным реагентам, к фотошаблонам, к технологическому оборудованию и оснастке и технической документации для организации производства интегральных микросхем (ИМС).

Проанализирована структура заводов для массового производства ИМС и пилотных линий (мини-

фабрик, минифабов) для мелкосерийного производства микросхем, приведены стоимостные оценки их составных частей. Показано влияние микроэлектроники на развитие производительных сил и уровень жизни современного общества.

В книге рассмотрена и проанализирована кривая развития технологии микроэлектронного производства. Показано, что процесс развития производства ИМС на базе классической КМОП-технологии на планарных МОП-транзисторах, формируемых на объемном монокремнии (planar bulk CMOS technology), подошел к своему пределу, и в ближайшее время произойдет смена базовой технологии. Даны прогнозы по стратегии развития технологии микроэлектроники.

Проанализирован закон Гордона Мура ("Moore's Law"), в соответствии с которым в течение последних 30 лет развивается технология микроэлектроники, и показано, что он является следствием закона опыта (Experience Law) применительно к специфике микроэлектронного производства.

Сформулирован закон опыта для микроэлектронного производства, и рассмотрены возможности обеспечения снижения основного целевого параметра производства ИМС — стоимость на функцию (cost/function) — на 29 % в год. Показаны решающие преимущества развития технологии микроэлектроники в соответствии с законом Мура и пределы его применения.

Даны рекомендации по комплектам технологического оборудования для получения структур в субстананометровой области и контрольно-измерительного оборудования для исследования таких структур. Показаны основные сферы применения нанотехнологии, перспективы их промышленного внедрения и даны рекомендации по стратегии ее развития в России.

Проанализированы современные определения нанотехнологии, показано, что все они базируются на едином научном основании, а именно, коллоидном (ультрадисперсном) состоянии вещества, открытом в начале 20-го века и изучаемом первоначально коллоидной химией.

Показано, что своеобразие коллоидного состояния вещества, связанное с получением уникальных физико-химических свойств, определяется большой удельной поверхностью дисперсной фазы, физико-химическим взаимодействием дисперсной фазы и дисперсионной среды на границе раздела фаз, а также квантовомеханическими эффектами. Многообразие коллоидных систем обусловлено тем, что об-

разующие их фазы могут находиться в любом из трех агрегатных состояний и, кроме того, иметь неорганическое, органическое и биологическое происхождение.

Рассмотрены основные типы наночастиц и основные методы получения коллоидных (ультрадисперсных, наноструктурированных) систем: диспергационные, конденсационные, диспергационно-конденсационные и конденсационно-диспергационные.

Проведен анализ возможностей основных методов наноструктурирования для создания топологических рисунков с элементами субстананометрового диапазона (нанопаттернирования) интегральных наносхем (ИНС), приведены наиболее перспективные области применения.

Показаны возможности, ограничения, технологические маршруты изготовления, области применения и перспективы развития новых логических структур и структур памяти, устройств полимерной и молекулярной электроники, приборов квантовой и оптической электроники, микро- и наноэлектромеханических систем (МЭМС и НЭМС).

Показаны различные варианты изготовления логической (ИНС), сенсорной и исполнительной подсистем НЭМС на одной пластине и на разных пластинах, а также рассмотрены возможности их тестирования и совместного монтажа для выбора оптимального варианта по стоимости, технологичности изготовления и сборки.

Книга предназначена для инженеров и научных работников, специализирующихся в области технологий микроэлектроники и нанотехнологий. Для школьников старших классов, студентов и аспирантов высших учебных заведений, обучающихся по специальностям 210601 "Нанотехнология в электронике" и 210602 "Наноматериалы" направления подготовки 210600 "Нанотехнология", по специальностям 210104 "Микроэлектроника и твердотельная электроника" и 210108 "Микросистемная техника" направления подготовки 210100 "Электроника и микроэлектроника", книга может быть использована в качестве учебного пособия. Для преподавателей вузов эта книга может служить справочным, обзорным и лекционным материалом.

По вопросам приобретения обращаться: по почте 115487, Москва, ул. Нагатинская, 16 а, ФГУП "ЦНИИХМ", отдел внешней экономической деятельности; по телефонам 8-499-611-72-63 и 8-499-611-87-37; по электронной почте NTRVED@cniihm.ru

CONTENTS

Negulyaev G. A., Nenakhov G. S. *Nanotechnologies. What is Best: to Publish, to Keep Secret or to Patent?* 2

The article contains a general analysis of patenting trends in the area of nanotechnologies. With due account to a multi-disciplinary character of this area the main means of patent searching are described. The article gives some recommendations relating to decision-making on the advisability of patenting and licensing of inventions in the area of nanotechnologies depending on the patent and competition situation on the market. A relationship between various methods of protection of intellectual property rights relating to nanotechnological inventions is shown, namely publishing in the open scientific and technical literature (copyright), patenting and keeping as a commercial secret (know-how).

Keywords: nanotechnologies, patenting trends, patent searching, licensing, intellectual property rights, copyright, commercial secret (know-how).

Bobrinetskii I. I., Nevolin V. K., Gorshkov K. V., Dan'kin D. A. *The Carbon Nanotube Based Integrated Structure Formation with Making Use of Dielectrophoresis* 10

We have developed dielectrophoresis methods of controllably and synchronous deposition of different types of carbon nanotubes at the wafer with connecting electrodes matrix. We have suggested electrode geometry modifications for structures manufacturing based on single nanotubes or its network. This work demonstrated the opportunity of dielectrophoresis methods application for carbon nanotubes integration in the conventional microelectronics processes.

Keywords: nanotubes, sensors, dielectrophoresis, microelectronics.

Chaschuhin V. G. *Dry Adhesive Material for Grippers in Robotics* 13

The contacting devices of miniature robot are studied. Contact surfaces of the devices are made from an adhesion fibrous material. Main parameters, required for such facilities are estimated. The results of this work may be used for miniature robots that move in limited space. This work was supported by RFBR grants N 08-01-00365 and N 07-01-12015.

Keywords: microrobotics, mechatronics, adhesion, nanostructured materials.

Shtennikov V. N. *Minimization Problems of Contact and Laser Soldering Time* 18

The contact and laser soldering has small time of heating and the big temperature difference. In article contain recommendations about duration of the contact and laser soldering.

Keywords: the device, assemblage, microelectronics, MST, soldering, quality.

Agasiyev A. A., Maharramov E. M., Jabbarov J. H., Mamedov M. Z. *Heat Expansion of Solids* 21

It is shown that length increase of bar from solid materials actually takes place in slight temperature changes and increases and is in proportion to distance changes among atoms. Harmonic oscillations don't cause changes in bar length. However, power returning atoms to balance position drives to anharmonicity appearance which is described with cubic term in expression of potential energy.

Keywords: length, bar, slight, interatomic distance, harmonicity, cubic term.

Djuzhev N. A., Popravkin A. N., Shkuropat I. G., Shokin A. N., Popkov A. F. *Universal Thermosensitive Element for Gas Flow Sensor* 23

Article is devoted to methods of creation, development and practical application of resistive type thermosensitive elements based on silicon technology with reference to area of measurement of speed of a stream and the charge of gases.

Keywords: microthermoanemometer, gas flow measurement, silicon technology, gas flow sensor.

Tourkine I. A. *Effects of Partial SAW Reflection of Masking Bus-Bar IDT Borders in Quasi-Slanted SPUDT Filters* 26

The paper discusses an effect of partial SAW reflection off masking bus-bar SPUDT borders and presents recommendations to reduce negative influence on frequency responses in SAW filter transmission band. This effect was explored on quasi-slanted SAW filter FP-474 (70B38v1 D), however it can be observed in a whole series of SAW filters with similar topological features. Minimization of this effect allows reducing ripple of frequency responses behavior in filter transmission band, thus it will give an opportunity to make SAW filters of better quality.

Keywords: surface acoustic wave (SAW), filter, single phase unidirectional transducer (SPUDT), bandwidth (BW), amplitude ripple (AR), group delay variable (GDV).

Amelichev V. V., Budanov V. M., Gusev D. V., Sokolov M. E., Sukhanov V. S., Tikhonov R. D. *Design and Manufacture of Pre-Production Models Artificial Tactile Mechanoreceptor for Endoscope* 30

The constructive-technological basis of manufacturing of a two-dimensional matrix integrated tensoresistive converters of pressure MIPD-19 from 19 sensitive elements generated on the silicon chip for the tactile gauges applied to diagnostics is described. The matrix has resolution of 2,5 mm; average value of sensitivity is equal 22,1 mV at voltage of a food of the bridge 2,5 V and pressure 40 kPa, i.e. 0,221 mV/V/kPa or 22,1 mV/V/bar absolute sensitivity of measuring instruments pressure practically does not depend on size initial offset the bridge.

Keywords: tensoresistive converter, the integrated tactile gauge.

Belozubov E. M., Belozubova N. E., Vasiliev V. A. *Thin-Film MEMS and Sensors Based on Such Technology*. 35

Thin-film tensoresistance and capacitive microelectromechanical systems (MEMS) are considered and classified. The generalized system models of the thin-film capacitive pressure sensors are presented used as the sensing elements of relevant MEMS.

Keywords: thin-film microelectromechanical systems (MEMS), thin-film tensoresistance MEMS, thin-film capacitance МЭМС, generalized system model.

Obraztsov R. M. *Development and the Analysis Elastic Supporting Members for a Sensitive Element of a Small-Sized Piezoelectric Bimorph a Vibrating Gyroscope* 39

Adducing finite-element modeling results, carried out by means of the program complex ANSYS, elastic supporting members, developed by the author, for a sensitive element of a small-sized piezoelectric bimorph vibrating gyroscope. Analysis of them is conducted. The modeling results of the two other known variants of supporting members with the same sensitive element are adduced.

Keywords: elastic supporting members, gyroscope, piezoelectric ceramics, bimorph beam.

Usanov D. A., Skripal A. V., Avdeev K. S. *Application of Frequency Modulated Semiconductor Laser Autodine for the Determination of Object Distance*. 43

The results of simulation of autodine signal spectrum of frequency-modulated semiconductor laser meter have been presented. Using autodine signal spectrum of semiconductor laser diode with modulation of radiation wavelength the technology of object distance determination with accuracy to within 1 % has been described. On the basis of developed procedure the application examples of semiconductor laser autodine for determination of surface profile have been shown.

Keywords: laser autodyne, light modulation, microprofile measurement, autodyne signal.

Kolobov Yu. R., Druchinina O. A., Ivanov M. B., Sirota V. V., Lazebnaya M. A., Khramov G. V., Trusova Ya. V., Sergeeva N. S., Sviridova I. K. *Formation of Porous Composite Bioactive Coatings on Titanium Alloys VT6 and VT16 Via Microarc Oxidation Treatment*. 48

The results of scanning electron microscopy and scanning probe microscopy investigations of the morphology of composite bioactive coatings, formed on titanium alloys VT6 (RU) and VT16 (RU) are presented. The possibility to form coatings with various porosity depending on type of the substrate material, composition of the electrolyte, as well as parameters of the micro-arc oxidation process is shown. In vitro data indicates satisfactory matrix (for cells) properties of the surface of the tested coatings.

Keywords: titan alloys, biocompatibility, hydroxyapatite, calcium phosphate coatings, surface modification, micro-arc treatment, combined bioactivity coatings.

For foreign subscribers:

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

The journal bought since november 1999.

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

ISSN 1813-8586.

Address is: 4, Stromynsky Lane, Moscow, 107076, Russia. Tel./Fax: +7(499) 269-5510.

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

Адрес редакции журнала: 107076, Москва, Стромьинский 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 16.12.2008. Подписано в печать 23.01.2009. Формат 60×88 1/8. Бумага офсетная. Печать офсетная.

Усл. печ. л. 6,86 Уч.-изд. л. 8,46. Заказ 43. Цена договорная

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