

НАНО- и МИКРОСИСТЕМНАЯ ТЕХНИКА

№ 8(145) ♦ 2012

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 систему Российского индекса научного цитирования

Главный редактор

Мальцев П. П.

Зам. гл. редактора

Лучинин В. В.

Редакционный совет:

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

Редакционная коллегия:

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

Отв. секретарь

Лысенко А. В.

Редакция:

Григорин-Рябова Е. В.
Чугунова А. В.

Учредитель:

Издательство
"Новые технологии"

Издается с 1999 г.

СОДЕРЖАНИЕ

Шубарев В. А., Меткин Н. П., Весничева М. В. Научно-техническая программа Союза государств "Микросистемотехника" — основа создания нового поколения микросистемотехники и унифицированных интегрированных систем двойного назначения на ее основе.	2
МАТЕРИАЛОВЕДЧЕСКИЕ И ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ МНСТ	
Аваков С. М., Агейченко А. С., Зуев В. П., Корнелюк А. И., Матюшков В. Е., Самохвалов В. К., Точицкий Я. И., Трапашко Г. А., Барышников Д. П., Русецкий В. А. Специализированное оптико-механическое и контрольно- измерительное оборудование для промышленного производства изделий микро- системотехники.	7
Барбарчук Д. В., Клим О. В., Мазовка Т. Е., Ковальчук Г. Ф., Ковенский А. Е., Царюк А. В., Циркун Д. П., Школык С. Б., Барышников Д. П., Шубарев В. А. Оборудование для сборки изделий микросистемотехники.	15
МОДЕЛИРОВАНИЕ И КОНСТРУИРОВАНИЕ МНСТ	
Михайлов А. Н., Берлик С. А., Михайлов Е. А. Методология автоматизированного контроля параметров датчиков изделий микросистемотехники.	22
Галисултанов А. Т., Дзюбаненко С. В., Игнатьев В. С., Силаков Д. М., Калинин В. А. Акустоэлектронные датчики силы в системах безопасности гидроагрегатов ГЭС . .	24
Таратын И. А., Сердюк И. В., Смирнов М. С., Гринчук А. П. Датчики пожарных извещателей на основе низкоэнергопотребляющих газовых сенсоров для раннего предупреждения возгораний.	28
Тимошенков С. П., Калугин В. В., Кочурина Е. С., Анчутин С. А., Калинин В. А., Строганов К. А. Микроакселерометры на различные диапазоны измерения линейных ускорений для систем инерциальной навигации.	32
ПРИМЕНЕНИЕ МНСТ	
Пинаев В. В., Суханов В. С., Панков В. В., Михайлов Ю. А., Данилова Н. Л., Былинкин С. Ф., Гаврилов А. А., Шипунов А. Н. Интегральные МЭМС-датчики с повышенной стабильностью выходных параметров.	36
Гончар И. И., Киселев Л. Н., Михайлов А. Н., Певгов В. Г., Семенов А. В., Шубарев В. А. Терморезисторные датчики измерения изменений уровня криоген- ных сред.	41
Бубнов Ю. З., Вишевик Л. Н., Сердюк И. В., Смирнов М. С. Полупроводниковые газовые сенсоры с мембранной структурой для пожарных извещателей.	45
Михайлов А. Н., Косинский В. Н. Датчики деформации и системы мониторинга конструкционной безопасности зданий и сооружений.	50
Contents.	55

Аннотации на русском и английском языках с 1999 г. по настоящее время находятся
в свободном доступе на сайтах журнала (<http://novtex.ru/nmst/>, <http://www.microsystems.ru>) и
научной электронной библиотеки (<http://elibrary.ru>). Электронные версии полнотекстовых
статей расположены на сайте журнала: с 1999 г. по 2010 г. в разделе "АРХИВ".

ПОДПИСКА:

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

Адрес для переписки:

107076 Москва, Стромьинский пер., д. 4
e-mail: nmst@novtex.ru

В. А. Шубарев, д-р техн. наук, проф.,
ген. директор,
Н. П. Меткин, д-р техн. наук, проф.,
пом. ген. директора,
М. В. Весничева, канд. физ.-мат. наук,
доц., гл. специалист,
ОАО "Авангард", Санкт-Петербург
e-mail: avangard@avangard.org

НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКАЯ ПРОГРАММА СОЮЗНОГО ГОСУДАРСТВА "МИКРОСИСТЕМОТЕХНИКА" — ОСНОВА СОЗДАНИЯ НОВОГО ПОКОЛЕНИЯ МИКРОСИСТЕМОТЕХНИКИ И УНИФИЦИРОВАННЫХ ИНТЕГРИРОВАННЫХ СИСТЕМ ДВОЙНОГО НАЗНАЧЕНИЯ НА ЕЕ ОСНОВЕ

Поступила в редакцию 24.05.2012

Представлена научно-техническая программа Союзного государства России и Республики Беларусь "Микросистемотехника", ее актуальность, цели и задачи. Рассмотрены научно-технический, политический, социально-экономический и коммерческий аспекты реализации программы.

Ключевые слова: научно-техническая программа Союзного государства, микросистемная техника, изделия микросистемной техники, специальное технологическое и метрологическое оборудование, компонентная база радиоэлектроники

Введение

Постоянно возрастающие требования к технико-экономическим показателям систем специального назначения и гражданской техники, включая системы транспорта, навигации, инфотелекоммуникаций, средства связи, жизнеобеспечения и безопасности, медицины и повышение эффективности их проектирования, производства и использования в различных сферах экономики заставляют искать новые технические решения, опираясь на новейшие достижения науки и техники в области компьютерного проектирования, полупроводникового и других разделов материаловедения, современных микроэлектронных технологий и перспективных средств для исследований, технологического и метрологического обеспечения [1].

Основными мировыми тенденциями в области науки, техники и технологий на протяжении пос-

ледних десятилетий являются микроминиатюризация и интеграция систем при непрерывном совершенствовании их технических характеристик, которые основаны на использовании новых технологических возможностей микроэлектроники и микромеханики. Отдельными составляющими изделий микросистемной техники (ИМСТ) являются микроэлектромеханические, включающие микро-робототехнические средства, микрооптоэлектромеханические, микроакустоэлектромеханические, микроаналитические и другие системы, обеспечивающие выполнение функций за счет преобразования механической энергии, оптического, акустического и других видов воздействий в электрический сигнал с помощью ИМСТ.

Одним из важнейших аспектов сотрудничества Российской Федерации и Республики Беларусь, декларированных Договором о создании Союзного государства от 8 декабря 1999 г., является создание и эффективное функционирование общего научно-технического и производственного потенциала путем реализации совместных научно-технических программ с учетом тенденций и перспектив научно-технического прогресса в ведущих странах мирового сообщества.

Научно-техническая программа Союзного государства "Разработка и создание нового поколения микросистемотехники и унифицированных интегрированных систем двойного назначения на ее основе" на 2010—2013 годы (шифр "Микросистемотехника"), далее Программа, посвящена созданию нового поколения микросистемотехнических радиоэлектронных устройств различных уровней интеграции на основе технологий микросистемотехники, разработке высокоэффективного автоматизированного технологического и метрологического оборудования и систем автоматизированного проектирования, относящихся к классу критических и прорывных технологий [2]. Программа направлена на повышение уровня научно-технической, экономической и технологической независимости Российской Федерации и Республики Беларусь в части разработки и применения ИМСТ в перспективных системах вооружений и техники гражданского назначения.

Программа является логическим продолжением ряда Федеральных целевых программ Российской Федерации, результатом анализа достижений и недостатков, выявленных в процессе выполнения конкретных разработок ИМСТ, приборов и систем на их основе на различных предприятиях России и Беларуси. Ее формирование велось исходя из основных положений "Стратегии развития электронной промышленности России на период до 2025 года" с учетом результатов Федеральной целевой программы "Национальная технологическая база на 2002—2006 годы", целей и задач Федеральной целевой программы "Развитие электронной компонент-

ной базы и радиоэлектроники на 2008—2015 годы", положений "Основ политики Российской Федерации в области науки и технологий на период до 2010 года", "Основ политики Российской Федерации в области развития электронной компонентной базы на период до 2010 года и на дальнейшую перспективу", Указа Президента Республики Беларусь от 06.07.2005 года № 315 "Об утверждении приоритетных направлений научно-технической деятельности в Республике Беларусь", "Государственной программы развития радиоэлектронной промышленности Республики Беларусь на 2006—2010 годы" (Постановление Совета Министров Республики Беларусь от 20.12.2005 года № 1493).

Программа "Микросистемотехника" разработана Министерством промышленности и торговли Российской Федерации (Минпромторг России) и Министерством промышленности Республики Беларусь (Минпром Беларуси) в соответствии с Постановлением Совета Министров Союзного государства от 26 июня 2009 года № 20 и в установленном порядке утверждена к исполнению Постановлением Совета Министров Союзного государства от 25 февраля 2010 г. № 1.

Основные цели и задачи Программы

Целью Программы является повышение тактико-технических, эксплуатационных и экономических характеристик новых поколений изделий гражданского, специального и двойного применения на основе использования устройств микросистемной техники новых поколений.

Программа реализует задачи разработки и создания:

- перспективной компонентной базы и унифицированных электронных модулей, блоков, узлов ИМСТ, необходимых для выпуска высокотехнологичной наукоемкой радиоэлектронной продукции мирового уровня и новых поколений технических систем гражданского, специального и двойного применения;
- высокоэффективных промышленных технологий, образцов технологического, метрологического оборудования и интегрированных систем автоматизированного производства сложных компонентов, аппаратуры и систем на базе ИМСТ, необходимых для технического перевооружения предприятий, разрабатывающих и производящих конкурентоспособные ИМСТ;
- интегрированных систем автоматизированного проектирования сложных компонентов, аппаратуры и систем на базе ИМСТ.

Основным результатом Программы станет вновь созданная научно-техническая база для развития и технологического перевооружения предприятий, разрабатывающих и производящих ИМСТ для внутреннего и мирового рынка, на основе новых

технических решений, технологий, специального технологического и метрологического оборудования — Российско-Белорусский центр микросистемотехники (ЦМСТ). Создание на базе ОАО "Авангард" ЦМСТ, в котором будет проводиться отладка серийной технологии промышленного производства ИМСТ, является дополнительным внепрограммным мероприятием.

Направления и структура работ по Программе

Программа характеризуется комплексным подходом к решению поставленных задач. Структура работ, проводимых по Программе, представлена на рис. 1.

Можно выделить следующие основные направления, по которым ведутся работы.

Разработка параметрических рядов унифицированных ИМСТ для измерения физических, механических и химических параметров сред.

В рамках данного направления создается перспективная компонентная база и унифицированные электронные модули, блоки, узлы изделий МСТ для следующих типов интегрированных систем двойного применения:

- инерциальной навигации;
- мониторинга пожарной, газовой и экологической безопасности;
- измерения напряженно-деформированного состояния особо опасных объектов;
- определения уровня и расхода газовых и жидких сред.

Разработка специального технологического оборудования и средств метрологического обеспечения.

Направление нацелено на разработку:

- уникального, не имеющего зарубежных аналогов, технологического оборудования для производства чувствительных элементов, первичных преобразователей и интегрированных датчиков физических и химических величин на основе МСТ;
- метрологической и контрольно-измерительной аппаратуры для автоматизированного контроля производимых изделий МСТ.

САПР информационно-управляющих микросистем и унифицированных ИМСТ.

Выполнение работ по данному направлению обеспечит решение задачи разработки системы автоматизированного проектирования компонентов, аппаратуры и систем на базе изделий МСТ. Единая среда проектирования обобщит наработанные алгоритмы, современные программные средства и будет адаптирована под технологические возможности ЦМСТ. Общая концепция построения САПР информационно-управляющих микросистем и унифицированных ИМСТ представлена на рис. 2.

Апробация результатов программных мероприятий будет проводиться в ЦМСТ, создаваемом на

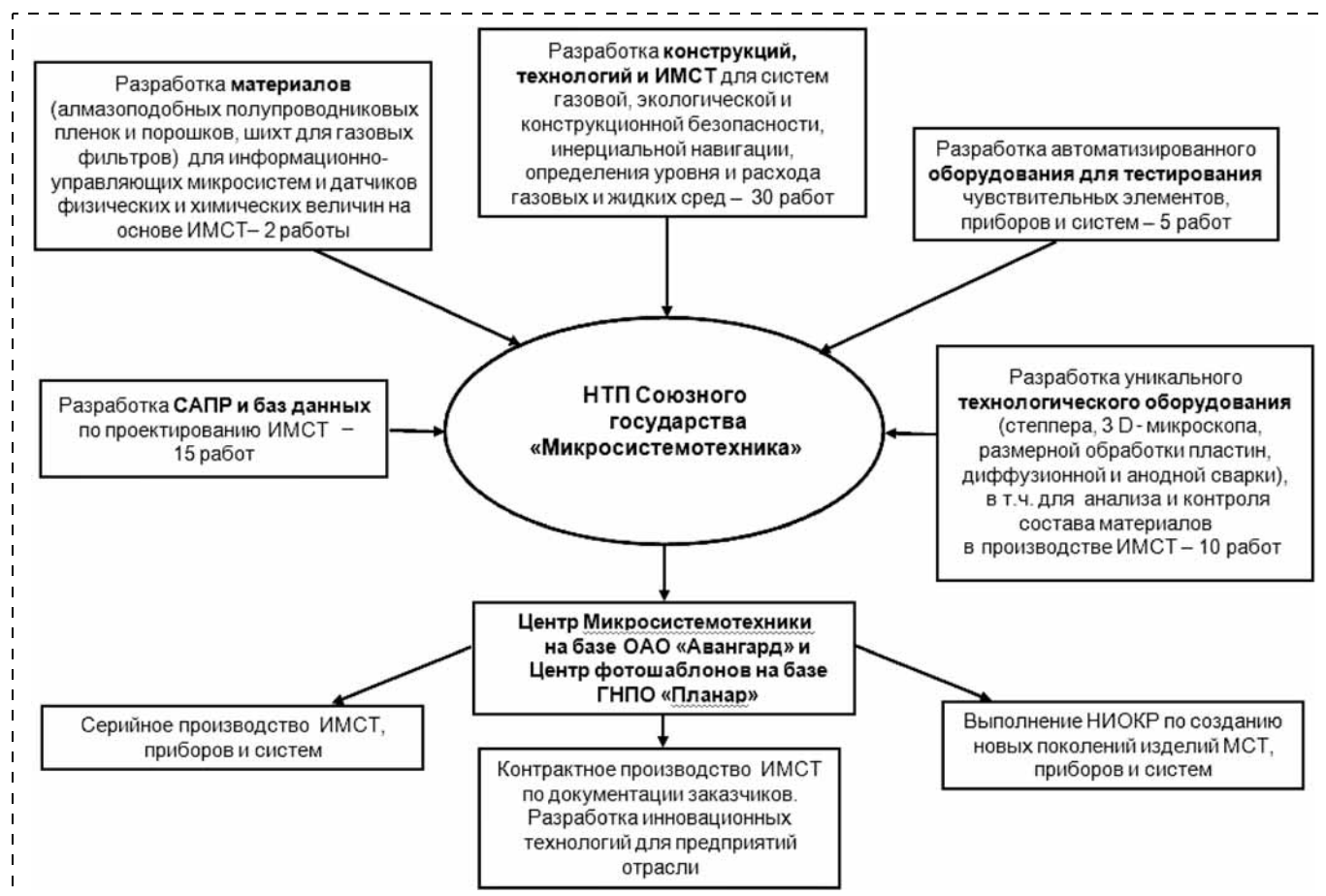


Рис. 1. Структура научно-технической программы "Микросистемотехника"

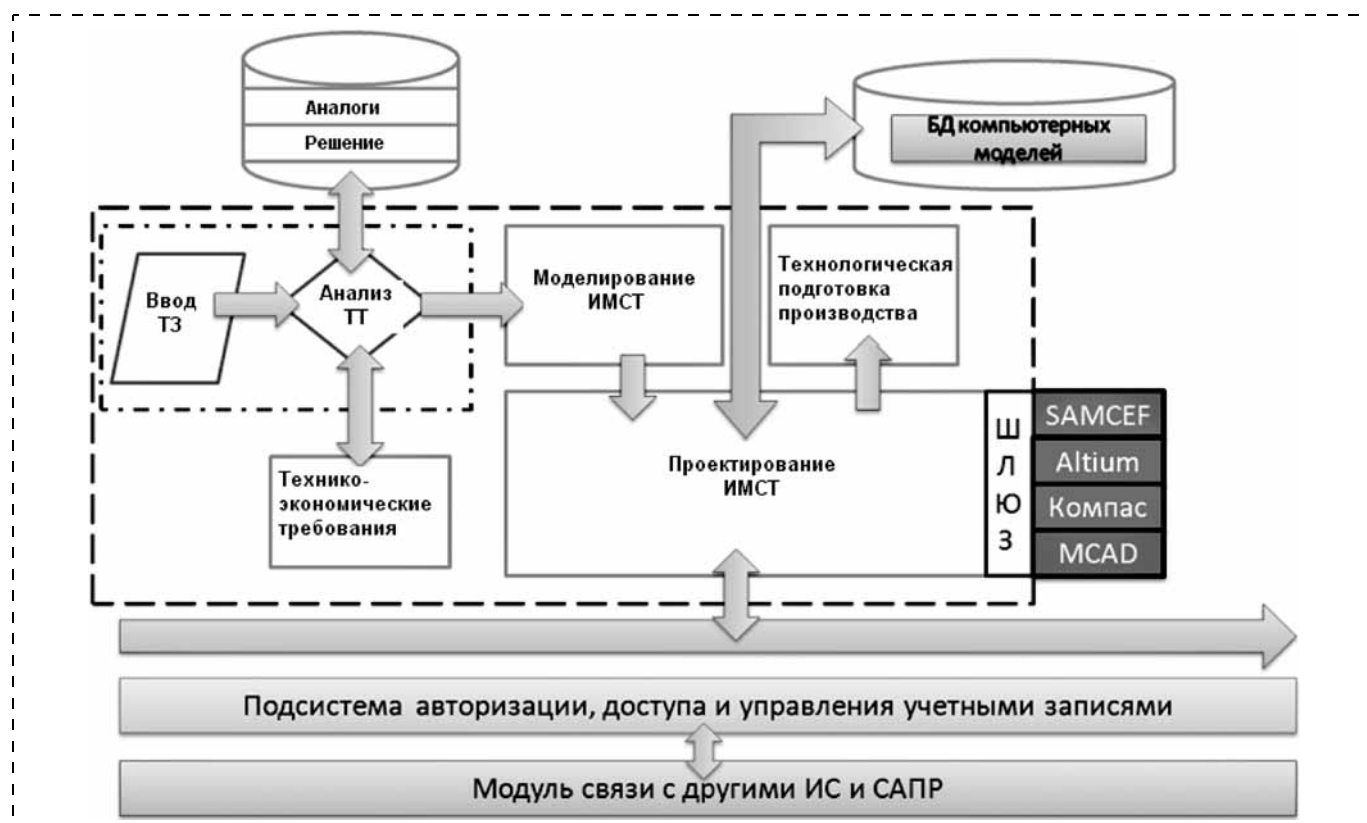


Рис. 2. Концепция построения САПР унифицированных ИМСТ

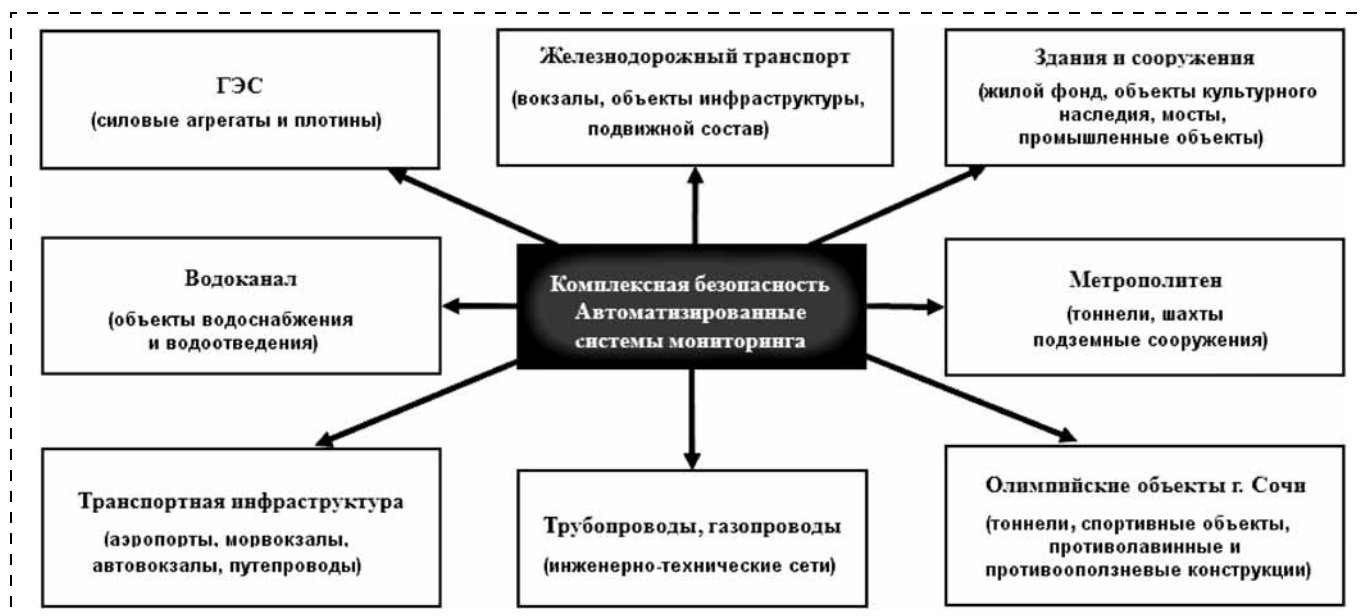


Рис. 3. Создание комплексных систем мониторинга безопасности многоцелевого назначения на основе ИМСТ

базе ОАО "Авангард", и в Центре фотошаблонов, создаваемом на базе ГНПО "Планар".

Создание в качестве пилотного проекта интегрированной производственной структуры является ключевой особенностью Программы. Реализация проекта будет способствовать обеспечению глубокого технологического переоснащения производств по выпуску продукции гражданского назначения и формирование технических и экономических условий для внедрения инновационных решений в производство специальной техники. Необходимо отметить, что Программа "Микросистемотехника" ориентирована на использование потенциала частно-государственного партнерства.

Коммерциализация и экономическая эффективность Программы

Особое внимание в ходе реализации Программы уделяется учету реальных потребностей рынка конечной продукции. Основная область применения разрабатываемых изделий — комплексные системы безопасности многоцелевого назначения для контроля функционального состояния и управления безопасной эксплуатацией технически сложных объектов, таких как транспортная инфраструктура, инженерно-технические сети, ГЭС, объекты ЖКХ и культурного наследия, олимпийские объекты и др. (рис. 3).

Автоматизированные системы мониторинга позволяют осуществлять непрерывный контроль функционального состояния технически сложных объектов и управление их безопасной эксплуатацией. Актуальность предлагаемых разработок подтверждается рядом законов и постановлений [3—5], нацеленных на предупреждение возникновения и развития чрезвычайных ситуаций, а также сниже-

ние размеров ущерба и потерь в случае их возникновения.

Такая направленность способствует коммерциализации результатов разработок, что позволит увеличить объем конкурентной продукции, производимой в интересах Российской Федерации и Республики Беларусь.

Экономический эффект от реализации Программы и характеристика рынка ИМСТ, а также приборов и систем на их основе приведены на рис. 4.

Осуществление мероприятий Программы позволит решить задачу насыщения рынка Российской Федерации и Республики Беларусь наукоемкой инновационной продукцией с увеличением отечественной доли в структуре мирового рынка ИМСТ до 6 % в 2015—2016 годах, обеспечить технологическую независимость и мировой технологический уровень радиоэлектронного комплекса государств-участников Союзного государства при производстве ИМСТ.

Организация производства массовой конкурентоспособной высокотехнологичной радиоэлектронной продукции для современных систем жизнеобеспечения, коммунального обслуживания, медицины, информационных и телекоммуникационных услуг позволит увеличить число рабочих мест в радиоэлектронном комплексе, повысить спрос на квалифицированные научно-технические кадры, обеспечить привлечение молодых специалистов и ученых в промышленное производство.

Заключение

Реализация Программы позволит приступить к модернизации существующих радиоэлектронных систем и созданию принципиально новых систем оборонного и гражданского назначения, что, в свою

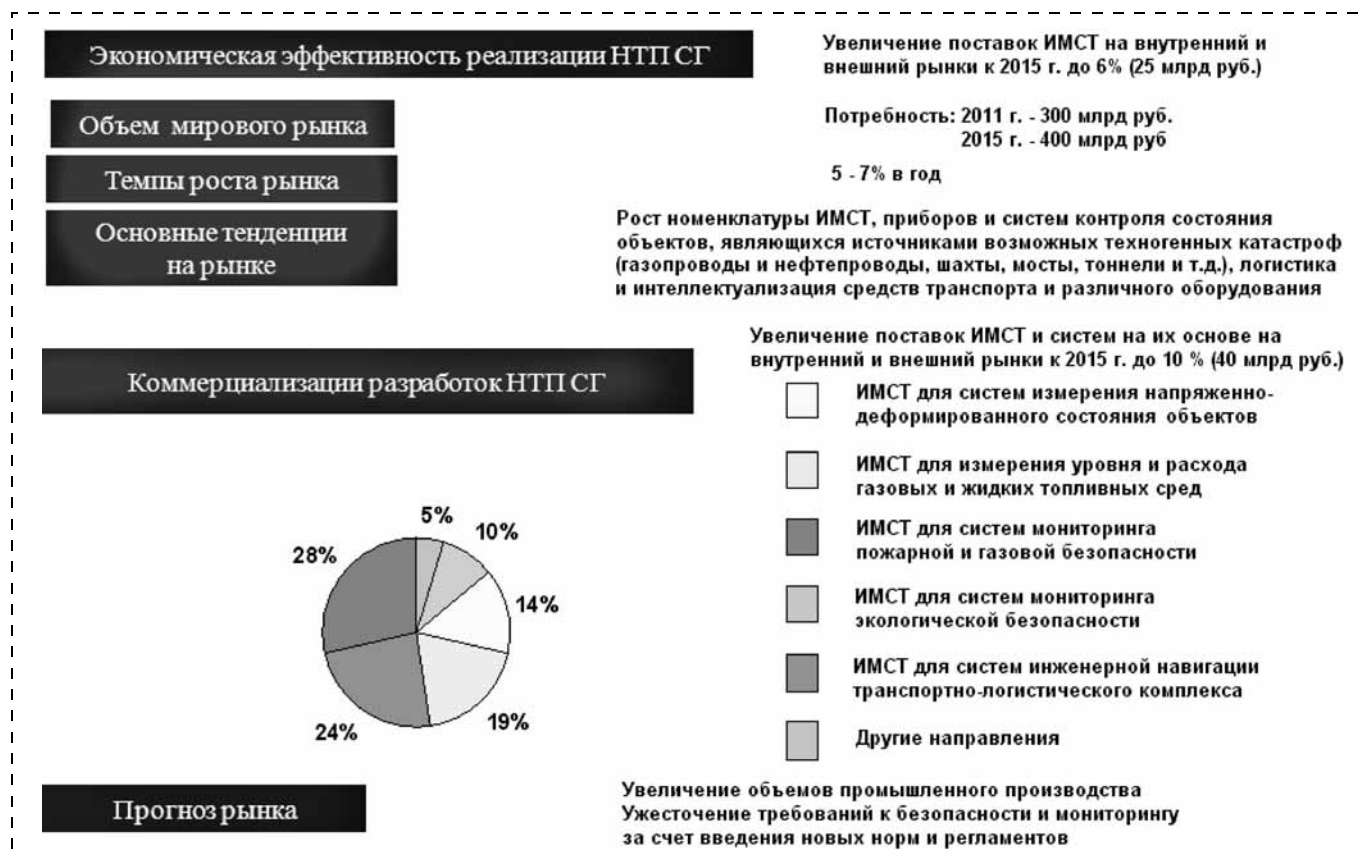


Рис. 4. Экономическая эффективность от реализации научно-технической программы "Микросистемотехника"

очередь, обеспечит повышение обороноспособности государств-участников Союзного государства и дальнейшее развитие отраслей промышленности, связанных с производством и эксплуатацией сложных технических систем специального и социального назначения.

Предлагаемые программные мероприятия соответствуют оборонным, а также социально-экономическим интересам государств-участников Союзного государства и направлены на развитие высокотехнологичного сектора, создание многофункциональных и высокоэффективных устройств, предназначенных для использования в оборонно-промышленном комплексе, авиакосмической промышленности, связи и телекоммуникаций и при производстве продукции двойного назначения, что соответствует основным направлениям деятельности Российской Федерации и Республики Беларусь на долговременную перспективу.

Результаты, полученные при выполнении Программы, в полной мере будут использованы в работах по обеспечению Федеральных целевых программ Российской Федерации и Государственных программ Республики Беларусь, выполняемыми предприятиями государств-участников Союзного государства, в том числе при реализации двойных технологий для систем навигации в системах специального и гражданского назначения (автоном-

ной навигации для ГИБДД, скорой помощи, автоперевозки), систем обеспечения безопасности жизнедеятельности и инженерно-технической безопасности особо опасных строительных объектов (метрополитен, тоннели, мосты, шахты, газопроводы), жилых зданий и социальных объектов, систем телекоммуникаций и ряда других систем двойного применения.

Настоящий выпуск журнала целиком посвящен изложению некоторых промежуточных научных результатов, полученных в рамках выполнения научно-технической программы Союзного государства.

Список литературы

1. Шубарев В. А. Микросистемотехника. Инновационное направление развития электроники // Электроника, НТБ. 2010. № 5. С. 98—99.
2. Перечень критических технологий РФ (Указ Президента РФ от 7 июля 2011 г. № 899).
3. Федеральный закон от 21.12.1994 № 68-ФЗ (ред. от 29.12.2010) "О защите населения и территорий от чрезвычайных ситуаций природного и техногенного характера".
4. Основы государственной политики в области обеспечения безопасности населения РФ и защищенности критически важных и потенциально опасных объектов от угроз природного, техногенного характера и террористических актов на период до 2020 года (Утверждены Президентом РФ 15 ноября 2011 г. № Пр-3400).
5. Федеральная целевая программа "Национальная технологическая база на 2012—2016 годы". Концепция подпрограммы "Современные средства индивидуальной защиты и системы жизнеобеспечения подземного персонала угольных шахт".

МАТЕРИАЛОВЕДЧЕСКИЕ И ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ МНСТ

УДК 621.382.002; 621.3.049.77

С. М. Аваков, д-р техн. наук, директор,

А. С. Агейченко, нач. отд.,

В. П. Зуев, зам. гл. инженера,

А. И. Корнелюк, нач. отд.,

В. Е. Матюшков, д-р техн. наук, проф.,
гл. инженер,

В. К. Самохвалов, нач. лаб.,

Я. И. Точицкий, канд. техн. наук,

Г. А. Трапашко, нач. отд.

Научно-производственное республиканское
унитарное предприятие "КБТЭМ-ОМО"

Государственного научно-производственного
объединения точного машиностроения "Планар",

г. Минск, Республика Беларусь,

e-mail: office@kbtem-omo.by

Д. П. Барышников, нач. отд.,

ОАО "Авангард", г. С.-Петербург,

Российская Федерация,

e-mail: avangard@avangard.org

В. А. Русецкий, аспирант,

Белорусский государственный университет

информатики и радиоэлектроники, г. Минск,

Республика Беларусь, e-mail: kanc@bsuir.by

СПЕЦИАЛИЗИРОВАННОЕ ОПТИКО-МЕХАНИЧЕСКОЕ И КОНТРОЛЬНО-ИЗМЕРИТЕЛЬНОЕ ОБОРУДОВАНИЕ ДЛЯ ПРОМЫШЛЕННОГО ПРОИЗВОДСТВА ИЗДЕЛИЙ МИКРОСИСТЕМОТЕХНИКИ

Поступила в редакцию 17.04.2012

Представлены предварительные результаты реализации научно-технической программы Союзного государства "Разработка и создание нового поколения микросистемотехники и унифицированных интегрированных систем двойного назначения на ее основе" в части создания специализированного оптико-механического и контрольно-измерительного оборудования для проведения фотолитографических и контрольных технологических операций в производстве изделий микросистемотехники.

Ключевые слова: микросистемотехника, формирование изображения, генератор изображений, мультипликатор, совмещение рисунков, критический размер, контроль плоскостности

Микросистемотехника — одно из самых быстроразвивающихся направлений в современной науке и технике. Наиболее развитые страны относят микросистемотехнику, равно как и микроэлектронику, к приоритетным направлениям развития отраслей экономики. Изделия микросистемотехники (далее по тексту ИМСТ) по стоимости, надежности, ресурсу, массогабаритным показателям, энергопотреблению, широте и эффективности применения настолько превосходят традиционные аналоги измерительных и других систем, что созданная без использования микросистемной техники продукция специального и гражданского назначения в ближайшем будущем может оказаться неконкурентноспособной.

К началу нынешнего столетия в мировой практике достигнут принципиально новый уровень в данной области, который позволит создавать различные системы военного и гражданского назначения. Благодаря значительному снижению габаритных размеров, массы, потребляемой мощности, а также стоимости производства область применения ИМСТ быстро расширяется. Новые разработки ИМСТ в США, Японии и других ведущих странах широко используются для совершенствования систем автоматического контроля параметров систем вооружений, а также (на коммерческой основе) промышленного оборудования, систем навигации и управления всеми видами транспортных средств и др.

К основным причинам, сдерживающим промышленный выпуск ИМСТ в Союзном государстве, следует отнести, в первую очередь, отсутствие необходимого технологического оборудования, в том числе специализированных систем контроля.

Именно для преодоления этого обстоятельства по инициативе Министерства промышленности и торговли Российской Федерации и Министерства промышленности Республики Беларусь сформирована научно-техническая программа Союзного государства "Разработка и создание нового поколения микросистемотехники и унифицированных интегрированных систем двойного назначения на ее основе" (Шифр "Микросистемотехника").

Программа утверждена Постановлением № 1 Совета Министров Союзного государства от 25 февраля 2010 года.

Уникальность Программы "Микросистемотехника" состоит в том, что наряду с созданием перспективных ИМСТ создается специализированное

оптико-механическое и контрольно-измерительное оборудование для их промышленного производства. Комплекс опытно-конструкторских работ в рамках Программы предусматривает разработку и освоение производства комплекта специализированного оптико-механического и контрольно-измерительного оборудования в следующем составе:

- установка совмещения и проекционного экспонирования на полупроводниковых пластинах;
- генератор изображений для работы с рельефными структурами на полупроводниковых пластинах;
- установка формирования двусторонних знаков совмещения на полупроводниковых пластинах;
- установка контроля линейных размеров топологических структур на фотошаблоне;
- установка автоматического контроля неплоскостности полупроводниковых пластин.

Это оборудование предназначено для формирования топологических структур ИМСТ как на фотошаблонах в диапазоне типоразмеров 127...178 мм, так и на пластинах диаметром 76...200 мм из различных полупроводниковых и пьезоэлектрических материалов с проектной нормой 350 нм и возможностью двустороннего совмещения.

Существенным отличием создаваемого оборудования от стандартного, широко применяемого в микроэлектронике, является возможность обработки подложек из пьезоэлектрических материалов: ниобата лития, танталата лития, пьезокварца, лангасита, лангата и др.

Физико-технические характеристики этих материалов коренным образом отличаются от кремния, что потребовало создания специальных фотоэлектрических систем для реализации автоматических процессов управления оборудованием (фокусировки, совмещения топологических структур и т. п.).

Ниже приведены основные показатели назначения создаваемого оборудования и краткое его описание.

Установка совмещения и проекционного экспонирования на полупроводниковых пластинах ЭМ-5784

Установка совмещения и проекционного экспонирования ЭМ-5784 (далее по тексту — мультипликатор) (рис. 1) предназначена для применения в технологическом процессе формирования топологических структур ИМСТ на полупроводниковых и пьезоэлектрических подложках из различных материалов (ниобат лития, танталат лития, пьезокварц и др.).

Формирование топологических структур изготавливаемых изделий осуществляется путем последовательного проекционного переноса микроизображений фрагментов топологии промежуточного фотошаблона (ПФШ) с редукцией 5:1 на пьезо-

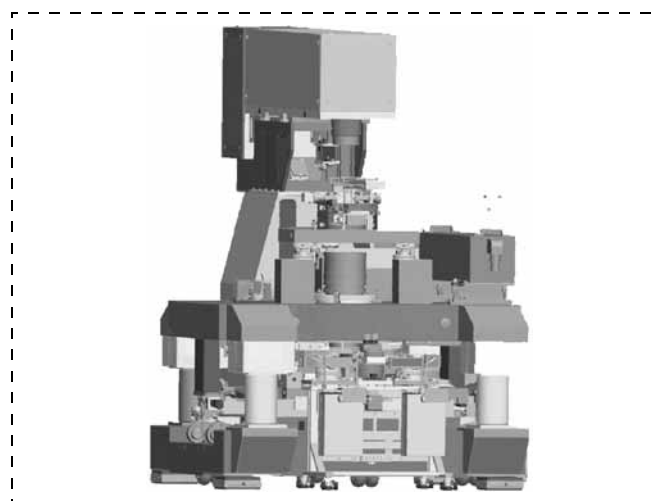


Рис. 1. ЭМ-5784

электрическую подложку, предварительно сориентированную по специальным знакам совмещения, расположенным на подложке и фотошаблоне.

Основные показатели назначения мультипликатора приведены в табл. 1.

Отличительные особенности мультипликатора ЭМ-5784 от отечественных мультипликаторов в традиционном исполнении:

- наличие координатного стола для прецизионного перемещения и позиционирования ПФШ, реализуемых автоматической системой с использованием датчика обратной связи на основе интерференционных решеток, что позволило значительно расширить технологические возможности установки и снизить требования к размеру поля проекционной системы;
- проекционная оптическая система построена на базе твердотельного лазерного источника излучения с длиной волны $\lambda = 354,7$ нм, что обеспечило значительное повышение надежности установки, а также снижение потребляемой мощности и эксплуатационных затрат;

Таблица 1

Наименование показателей назначения	Единица измерения	Значение показателей назначения
Размер минимального элемента	нм	350
Длина волны экспонирующего излучения	нм	354,7
Источник света	—	Твердотельный лазер 28 Вт, $F = 110$ кГц
Числовая апертура объектива (переменная)	—	0,45...0,61
Наличие верхнего координатного стола	—	Да
Диаметр полупроводниковых и пьезоэлектрических подложек	мм	76, 100, 150 мм

- возможность обработки пьезоэлектрических пластин.

В состав мультипликатора ЭМ-5784 входят следующие основные системы и устройства:

- устройство оптико-механическое;
- комплекс управляющий;
- программное обеспечение.

Устройство оптико-механическое содержит следующие функциональные узлы и системы:

- проекционный объектив;
- систему освещения с лазерным источником излучения;
- координатную систему;
- систему совмещения;
- систему анализа изображения;
- систему загрузки и ориентации подложек;
- систему загрузки и базирования шаблонов.

Комплекс управляющий обеспечивает управление функциональными системами мультипликатора по иерархическому принципу — от непосредственного управления отдельными системами на основе промышленных компьютеров нижнего уровня до общего управления от головного компьютера. Кроме того, управляющий комплекс обеспечивает контроль и диагностику состояния функциональных систем мультипликатора.

Развитое программное обеспечение имеет дружелюбный интерфейс и включает в себя технологические, рабочие, диагностические и аттестационные программы.

Мультипликатор последовательно работает в следующих автоматических режимах:

- загрузка пьезоэлектрических подложек из подающей кассеты на позицию предварительной ориентации, которая осуществляется по базовому срезу с применением бесконтактной фотоэлектрической системы с последующим переносом подложки с помощью автоматического манипулятора на предметный стол специальной конструкции;
- загрузка и базирование промежуточного шаблона (127 × 127 мм) относительно координатной системы;
- фокусировка и выравнивание подложки;
- измерение координат положения знаков совмещения на подложке с помощью фотоэлектрического датчика совмещения;
- измерение координат положения изображений знаков промежуточного шаблона с помощью системы анализа изображений;
- экспонирование и мультипликация фрагментов изображений промежуточного шаблона на пьезоэлектрическую подложку;
- автоматическая выгрузка проэкспонированной подложки в приемную кассету.

В соответствии с календарным планом разработанная конструкторская документация. В настоящее время выполняются работы по изготовлению опыт-

ного образца специализированного мультипликатора ЭМ-5784.

Приемочные испытания опытного образца планируются во второй половине 2013 г.

Генератор изображений для работы с рельефными структурами на полупроводниковых пластинах ЭМ-5289Б

Генератор изображений ЭМ-5289Б предназначен для безмасочного формирования рельефных структур на полупроводниковых пластинах, пластинах из ниобата лития, танталата лития, пьезокварца, лангасита, лангата (в дальнейшем — пьезоэлектрические пластины) с проектной нормой 350 нм, а также для изготовления фотошаблонов СБИС с проектной нормой от 180 нм. Он обеспечивает изготовление изделий под технологию фотолитографии с использованием фоторезистов, область максимальной чувствительности которых находится в области дальнего УФ излучения. Рисунок формируется сфокусированным лазерным излучением с длиной волны 257 нм.

Генератор формирует изображение на следующих типах заготовок:

а) полированные монокристаллические кремниевые подложки с типоразмерами 100 и 150 мм в соответствии со стандартом SEMI M1-0600;

б) пьезоэлектрические пластины с типоразмерами 76 и 100 мм с параметрами, приведенными в табл. 2.

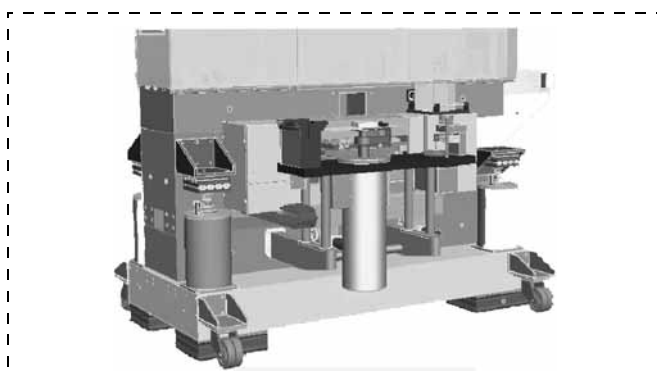


Рис. 2. ЭМ-5289Б

Таблица 2

Материал пластины	Диаметр пластины, мм	Локальная неравномерность, мкм, в модуле 10 × 10 мм	Общая неравномерность, не более, мкм	Прогиб, мкм
Ниобат лития	100 ± 0,2	5	10	40
Пьезокварц	100 ± 0,2	3	10	40
Танталат лития	76,2 ± 0,5	2	10	25

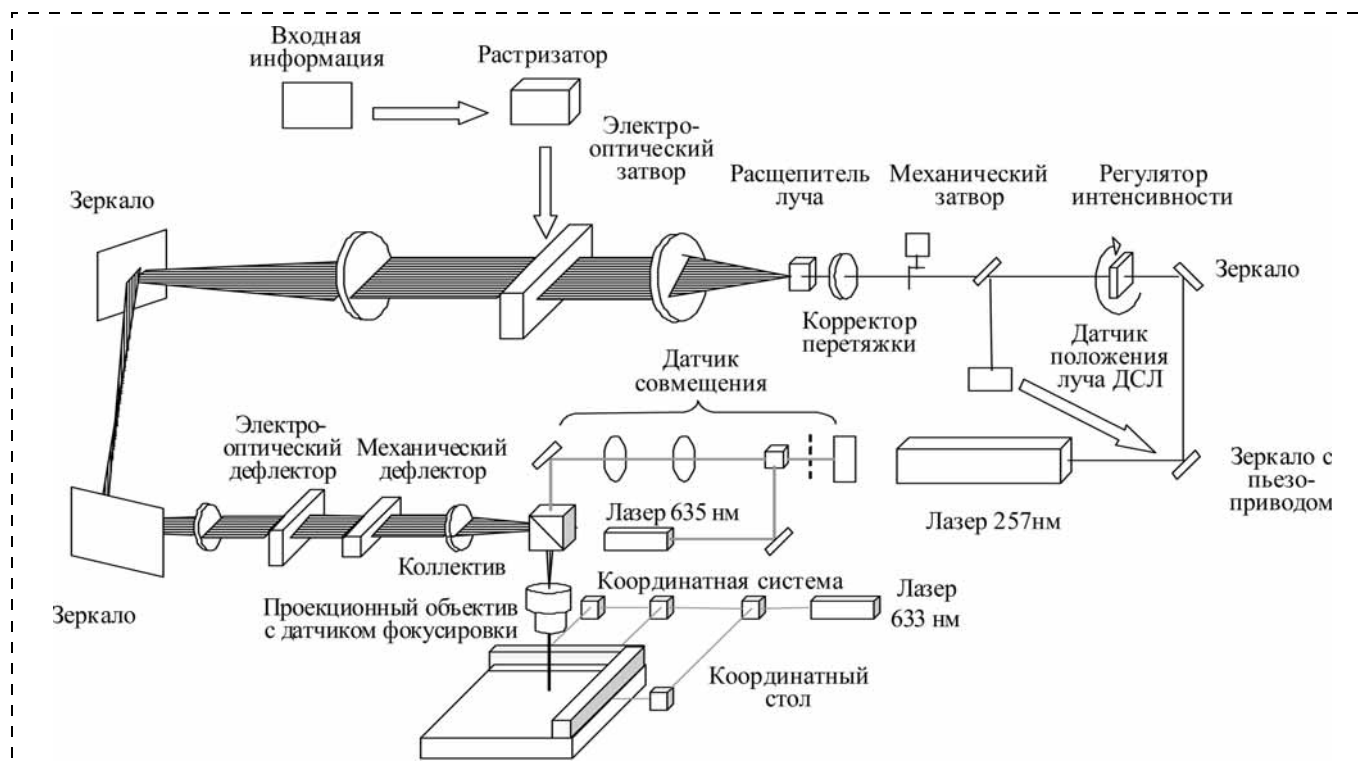


Рис. 3. Структурная схема генератора

в) стеклянные подложки для металлизированных фотошаблонов в соответствии со стандартом SEMI P1-92, изготавливаемые из материала с низким и очень низким коэффициентом теплового расширения с типоразмерами 127 мм (5"), 152 мм (6") и 178 мм (7"), толщиной от 2,2 до 6,45 мм.

Основные параметры и характеристики генератора:

- рабочий ход координатного стола — не менее 215 × 215 мм;
- производительность генератора — не менее 1,4 мм²/с.

Параметры, характеризующие точность формирования изображения, приведены в табл. 3.

Генератор является устройством формирования изображения растрового типа. Для такого способа формирования изображения характерно, что над любой точкой экспонируемого поля в какой-то момент времени появляется световое пятно. Рису-

нок синтезируется из пятен (пикселей), которые включаются в нужные моменты времени. В отличие от классического генератора растрового типа следует отметить следующие особенности данного генератора:

- многопроходная стратегия печати, что дает возможность устранять случайные погрешности при формировании изображения за счет усреднения;
- печать со вложенной сеткой и управлением уровнями серого, что позволяет увеличивать дискретность описания изображения, не увеличивая количество пикселей.

На рис. 3 представлена структурная схема генератора изображений.

В качестве рабочего лазера используется аргоновый лазер непрерывного действия с длиной волны 257 нм. Угловой уход луча контролируется датчиком положения луча и корректируется зеркалом с пьезоэлектрическим приводом. Устройство регулировки интенсивности позволяет управлять мощностью экспонирующего излучения с управляющего компьютера. Механический затвор перекрывает луч при загрузке шаблона, фокусировании и перемещениях стола, не предназначенных для экспонирования. Расщепитель луча разделяет луч на 32 пучка одинаковой интенсивности, которые в дальнейшем преобразуются в 32 линейно-поляризованных параллельных пучка и входят в электрооптический затвор. Электрооптический затвор на основании растрового описания полосы, поступа-

Таблица 3

Наименование параметра	Значение параметра, нм
Минимальный формируемый размер	350
Равномерность размера	25
Точность размера	25
Неровность края, в том числе для топологии с произвольным углом наклона	30
Погрешность совмещения второго слоя	60
Точность совмещения	50

ющего с блока формирования эталонного изображения, осуществляет модуляцию интенсивности каждого луча независимо друг от друга. Модуляция заключается в том, что плоскость поляризации каждого входящего луча поворачивается электрооптическим модулятором на угол, значение которого зависит от управляющего напряжения. Проходя через анализатор затвора, луч разделяется на два ортогонально поляризованных луча, один из которых задерживается диафрагмой. Энергия второго луча зависит от значения напряжения, приложенного к затвору, и управляется на основе информации, поступающей с блока формирования эталонного изображения. Далее 32 луча поступают на 4-каскадный электрооптический дефлектор. 1-й каскад отклоняет лучи на 320 мкм, 2-й — на 160 мкм, 3-й — на 80 мкм, 4-й — на 40 мкм. Отклонение происходит в направлении, перпендикулярном перемещению стола. Таким образом, получается столбец, состоящий из 512 пятен различной интенсивности, из которых синтезируется изображение. Дальнейшее формирование топологической структуры изделия на поверхности пластины осуществляется проекционным объективом с масштабом 133:1.

По сканирующей координате (координата X) развертка выполняется столом, перемещающимся со скоростью до 100 мм/с. Положение стола отслеживает лазерная интерферометрическая система с дискретностью отсчета 0,6 нм. Точность удержания стола по координате Y находится в пределах $\pm 0,01$ мкм. Отклонение по удерживаемой координате компенсируется с помощью механического дефлектора.

Функционально генератор представляет собой полный автомат при работе с полупроводниковыми и пьезоэлектрическими пластинами, в котором после задания начальных условий все операции — загрузка, ориентация, совмещение, экспонирование и выгрузка пластин осуществляются автоматически. При работе с заготовками фотошаблонов вручную выполняются операции загрузки — выгрузки.

Приемочные испытания опытного образца генератора ЭМ-5289Б планируются в конце 2012 г.

Установка формирования двусторонних знаков совмещения на полупроводниковых пластинах ЭМ-5186

Установка ЭМ-5186 (рис. 4) предназначена для формирования знаков совмещения с высокой точностью на двух сторонах подложки, прозрачной для актиничных лучей. Для этой установки разработана специальная контрольно-измерительная телевизионная система с объективом, ахроматизированным для актиничного и неактиничного излучений. Знаки совмещения на верхней стороне под-



Рис. 4. ЭМ-5186

ложки освещены неактиничным светом, который не экспонирует фоторезист на ее нижней стороне.

Результаты измерений положений знаков совмещения на подложке и в изображении обрабатываются специальной математической программой, что благодаря высокостабильной конструкции обеспечивает высокую точность совмещения знаков на двух сторонах подложки.

Вычисление положения осей знаков выполняется с точностью до десятков нанометров. Знаки совмещения в проекционном канале, формирующем знак на нижней стороне подложки, освещаются светодиодом с длиной волны 380 нм. Контрольный канал, измеряющий положение знаков совмещения, оснащен ахроматическим объективом для работы на двух длинах волн оптического излучения: 380 и 505 нм. Это позволяет измерять положение знаков совмещения, расположенных на верхней и на нижней плоскостях подложки.

Ресурс светодиодов, использованных для освещения и экспонирования, более 20 000 ч.

Прецизионные перемещения подложки осуществляются с помощью координатного стола с пьезоэлектрическим приводом, дискретность перемещения которого менее 10 нм.

Конструктивно параметры точности обеспечиваются высокой жесткостью станины, изготовленной из природного материала — габбро-диабазы, который имеет также высокую степень поглощения внешних механических возмущений. Станина является конструктивной метрологической базой, на которой расположены фотоэлектрические измерительные системы и прецизионные исполнительные механизмы установки.

Управление координатными перемещениями, ориентация подложки в координатной системе установки выполняются автоматически. Совмещение знаков на верхней стороне подложки с изображением знака совмещения на нижней стороне и его экспонирование осуществляются также автоматически.

Таблица 4

Наименование показателей назначения	Единица измерения	Значение показателей назначения
Размер минимального элемента	мкм	4,0
Размер рабочего поля ($\varnothing$)	мм	3,0
Масштаб переноса изображения	крат	4,0
Погрешность совмещения знаков на двух сторонах подложки (σ)	мкм	$\leq 0,1$
Диаметр подложки	мм	76, 100, 150 и 200

Рабочий цикл установки выполняется по заданной оператором программе автоматически. Оператор только загружает и выгружает подложки, а также вводит исходные данные в программу работы установки с помощью клавиатуры компьютера. При этом ввод параметров задания и ход цикла демонстрируются на экране дисплея. Взаимодействие оператора и установки осуществляется в интерактивном режиме.

Установка малогабаритная, настольного типа, на ней можно формировать знаки совмещения любого вида, в том числе фазовые и дифракционные. После нанесения знаков совмещения топологический рисунок на обеих сторонах подложки может быть сформирован на любых фотолитографических установках контактным или проекционным методом.

Основные показатели назначения установки ЭМ-5186 приведены в табл. 4.

Приемочные испытания опытного образца установки ЭМ-5186 проведены успешно в 2011 г. В первой половине 2012 г. планируется проведение технологических испытаний в условиях промышленного производства в ОАО "Авангард" (г. Санкт-Петербург, Россия).

Установка контроля линейных размеров топологических структур на фотошаблонах ЭМ-6339

Установка ЭМ-6339 (рис. 5) предназначена для выполнения операции контроля критических размеров элементов топологии фотошаблонов с размерами до 178×178 мм, защищенных пелликлами с обеих сторон на рамке высотой до 6 мм в автоматическом режиме.

Объектив высокого разрешения, работающий в ультрафиолете на i -линии (365 нм) в режиме проходящего света совместно с видеокамерой и специализированной программой обработки видеоданных, обеспечивает точные измерения элементов от 0,5 до 35 мкм со средним квадратическим отклонением результатов измерений 2 нм и оценку размеров в диапазоне до 0,35 мкм. Наряду с этим,

в установке также предусмотрена возможность контроля размеров элементов топологии на полупроводниковых и пьезоэлектрических пластинах, для чего в конструкцию добавлен осветитель отраженного света и комплект держателей пластин.

Для обеспечения высоких метрологических показателей базовые элементы конструкции выполнены из гранита и установлены на виброизолирующем основании.

Визуальный канал установки, работающий в режиме отраженного света видимого диапазона и реализованный как цифровая видеосистема, служит для наблюдения топологии, поиска контролируемых элементов и привязки топологических координат фотошаблона к координатной системе позиционирования установки. Большое поле наблюдения обеспечивает удобство просмотра топологии и контроль размеров в диапазоне до 500 мкм. Наблюдение можно вести одновременно двумя каналами, так как они работают через один объектив и не имеют механических компонентов переключения. Отсутствие подвижных деталей над объектом контроля при смене кратности увеличения значительно сокращает вероятность загрязнения образца частицами пыли. Компактная конструктивная реализация всех режимов наблюдений и контроля и их комбинаций стала возможной благодаря использованию управляемых светодиодных источников света, что повышает надежность, сокращает расходы на техническое обслуживание и энергопотребление, гарантирует стабильность измерений за счет отсутствия тепловых напряжений в системе.

Для достижения высоких метрологических характеристик и производительности контроля установка снабжена двумя системами фокусировки. При перемещении и наблюдении объекта работает лазерная система фокусировки. Ее преимущества — быстроедействие, большой вертикальный диапазон захвата поверхности объекта, многократно превышающий глубину резкости, независимость



Рис. 5. ЭМ-6339

Таблица 5

Наименование показателей назначения	Единица измерения	Значение показателей назначения
Диапазон размеров контролируемых элементов	мкм	0,5...35
Повторяемость измерений (σ)	нм	≤ 2
Время контроля элемента	с	≤ 1
Размер поля наблюдения визуального канала	мм	$0,5 \times 0,67$
Размер поля наблюдения измерительного канала	мкм	36×48
Оптическое увеличение для монитора 21 дюйм:		
• измерительный канал, монохромный УФ	крат	9000
• визуальный канал, видимый свет	крат	600
Дискретность перемещения фотошаблона	мкм	0,1
Скорость перемещения	мм/с	≤ 100
Потребляемая электрическая мощность	Вт	≤ 800

результата фокусировки от оптических свойств поверхности образца и, что наиболее важно, возможность фокусироваться на поверхность объекта, находящегося в движении (динамическая фокусировка). Принцип ее работы основан на поддержании минимального размера пятна от сфокусированного лазерного луча на поверхности фотошаблона. Источником излучения здесь служит полупроводниковый лазер с управляемой интенсивностью, работающий на длине волны 670 нм.

Вторая система фокусировки — алгоритмическая. Для достижения высокой повторяемости и объективности результатов измерений необходимо проводить измерение, когда изображение имеет наилучшее качество. Поиск такого изображения проводится в режиме вертикального сканирования с помощью специального алгоритма фокусировки, который находит изображение с экстремальным значением качественных показателей. В этом изображении по расстоянию между характерными точками, принадлежащими профилю распределения освещенности в изображении краев элемента, автоматически определяется его размер. Алгоритм определения размера элемента абсолютно устойчив к изменению уровня освещенности и контраста в изображении. Во время поиска объект неподвижен в горизонтальной плоскости (статическая фокусировка).

Для привязки единиц измерений к эталонам длины установка калибруется по мерам малых длин с известными размерами. Поправки сохраняются в памяти для коррекции результатов с автоматическим учетом диапазонов соответствия и условий применения.

Контроль размеров может осуществляться в ручном (исследовательском) и автоматическом режимах. Данные для автоматического режима вносятся оператором или формируются программой в режиме обучения.

Основные технические характеристики установки контроля критических размеров ЭМ-6339 приведены в табл. 5.

Приемочные испытания опытного образца установки ЭМ-6339 планируются в конце 2012 г.

Установка автоматического контроля неплоскостности полупроводниковых пластин ЭМ-6419

Установка ЭМ-6419 (рис. 6) предназначена для автоматической сортировки полупроводниковых и пьезоэлектрических пластин из различных материалов согласно заданным критериям отклонений от плоскостности, а также для работы в исследовательском режиме с выводом на экран монитора информации о форме поверхности пластины (карта высот в модулях заданных размеров, карта сортировки модулей, поперечное сечение рельефа поверхности пластины, трехмерное изображение рельефа поверхности и др.).

В основе работы установки лежит интерферометрический метод контроля. Отличительными особенностями установки являются одновременный съем информации со всей поверхности пластины на ПЗС-камеру высокого быстродействия, а также отсутствие элементов механического сканирования, что позволяет повысить жесткость конструкции и увеличить производительность контроля.

В качестве источника излучения используется управляемый одночастотный полупроводниковый

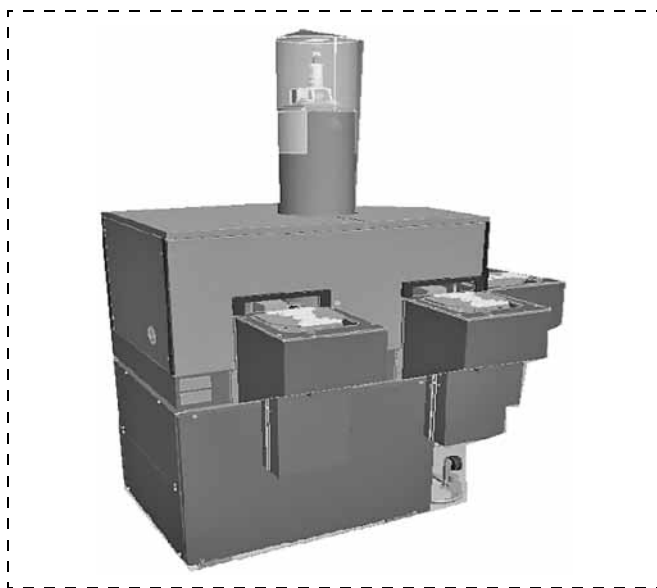


Рис. 6. ЭМ-6419

Таблица 6

Наименование показателей назначения	Единица измерения	Значение показателей назначения
Диаметр контролируемых пластин	мм	75, 100, 150 и 200
Погрешность контроля глобальных параметров в свободном состоянии	мкм	$\pm 2,5$
Погрешность контроля глобальных параметров в распрявленном состоянии	мкм	0,1
Погрешность контроля локальных параметров	мкм	$\pm 0,05$ мкм
Диапазон контроля толщины	мкм	300...800
Погрешность контроля толщины	мкм	$\pm 2,0$
Производительность контроля	пл/ч	≤ 80

инжекционный лазер фирмы *Hitachi* с длиной волны 685 нм. Сформированная интерференционная картина поступает на ПЗС-камеру фирмы *Jai* с матрицей 2048 × 2048 пикселей.

Информация о форме контролируемой поверхности поступает в результате обработки получаемой интерференционной картины. При этом используется модуляция разности фаз между рабочим и референтным волновыми фронтами, которая осуществляется путем изменения длины волны излучения лазера при изменении его тока накачки. Полученные при каждом изменении разности фаз сигналы ПЗС-камеры обрабатываются, в результате чего осуществляется точное восстановление высот в каждой точке контролируемой поверхности, привязанной к конкретному пикселю ПЗС-камеры. Используемый метод обработки имеет высокую помехоустойчивость, позволяющую получить высокую точность контроля. Показатели назначения установки приведены в табл. 6.

Приемочные испытания опытного образца установки ЭМ-6419 планируются в начале 2013 г.

* * *

Таким образом, создаваемый комплект специализированного оптико-механического и контрольно-измерительного оборудования станет основой в производстве ИМСТ нового поколения:

- высокоэффективного изготовления фотооригиналов топологических структур для технологического уровня 350...180 нм;

- формирования на полупроводниковых и пьезоэлектрических пластинах проекционным методом топологических структур технологического уровня 350 нм;
- формирования по "бесшаблонной" технологии на полупроводниковых и пьезоэлектрических пластинах топологических структур технологического уровня 350 нм;
- при реализации "смешанной" технологии;
- контроля критических размеров элементов топологии на фотошаблонах и пластинах;
- контроля плоскостности обрабатываемых пластин.

Список литературы

1. Volk W. W., Broadbent W. H., Garsia H. I., et al. // Proc. of the EMC 2002. January 15—16. Munich, Germany VDE Verlag, 2002. P. 163—173.
2. Kwok-Kit Wong A. Resolution Enhancement Techniques in Optical Lithography. — SPIE Press, USA, 2001. 213 p.
3. Behringer U. Foreword of the 19th European Mask Conference on Mask Technology for IC and Micro-Components. — GMM-GMM-Conf., Jan. 13—15, 2003, Sonthofen, Germany. P. 1—2.
4. Точицкий Я. И. Оптические технологии микро- и нанoeлектроники: учебно-метод. пособие. Минск: РИВШ, 2010. 300 с.
5. Есьман В. М., Окорок В. М., Стасевич М. Н. Устройство автоматической фокусировки: пат. 6302. Республики Беларусь. Заявитель УП "КБТЭМ-ОМО". Заяв. 07.08.09, опубл. 30.06.10.
6. Шулейко И. Б., Колупаев В. Д., Адзериho Б. Г. Устройство управления многокаскадным электрооптическим дефлектором: пат. 6587 Республики Беларусь. Заявитель УП "КБТЭМ-ОМО". Заяв. 01.03.10, опубл. 30.10.10.
7. Агейченко А. С., Есьман В. М., Трубчик И. Т. Проекционная экспонирующая система: пат. 7222 Республики Беларусь. Заявитель УП "КБТЭМ-ОМО". Заяв. 13.09.10, опубл. 30.04.11.
8. Точицкий Я. И., Трапашко Г. А., Матюшков В. Е. Способ двухстороннего совмещения и экспонирования: пат. 8442 Республики Беларусь. Заявитель УП "КБТЭМ-ОМО". Заяв. 17.10.03, опубл. 30.08.06.
9. Постоялко И. И., Самохвалов В. К., Степик В. М., Козлов В. Л. Способ контроля одномодового режима работы полупроводникового лазера: пат. 12908 Республики Беларусь. Заявитель УП "КБТЭМ-ОМО". Заяв. 14.03.08, опубл. 28.02.10.
10. Аваков С. М., Есьман В. М., Колупаев В. Д., Пушкин Л. В. Многоканальный генератор изображений: пат. 14775 Республики Беларусь. Заявитель УП "КБТЭМ-ОМО". Заяв. 23.06.09, опубл. 30.08.11.
11. Есьман В. М., Корнелюк А. И., Борисевич В. С., Пушкина Т. В. Способ аттестации координатных систем установок литографии: пат. 14141 Республики Беларусь. Заявитель УП "КБТЭМ-ОМО". Заяв. 29.12.08, опубл. 30.04.11.

Д. В. Барбарчук, нач. отд.,
О. В. Клим, инж.-констр. 1-й кат.,
Т. Е. Мазовка, вед. инж.,
Г. Ф. Ковальчук, ген. директор,
А. Е. Ковенский, нач. сект.,
А. В. Царюк, вед. констр.,
Д. П. Циркун, вед. констр.,
С. Б. Школьник, гл. констр.

Республиканское научно-производственное
 унитарное предприятие "КБТЭМ-СО"
 Государственного научно-производственного
 объединения "Планар"

г. Минск, Республика Беларусь,
 e-mail : kbtem@kbtem.by

Д. П. Барышников, нач. отд.,
В. А. Шубарев, д-р техн. наук, проф.,
 ген. директор,

Открытое акционерное общество "Авангард",
 г. Санкт-Петербург, Российская Федерация,
 e-mail : avangard@avangard.org.

ОБОРУДОВАНИЕ ДЛЯ СБОРКИ ИЗДЕЛИЙ МИКРОСИСТЕМОТЕХНИКИ

Поступила в редакцию 18.04.2012

Рассмотрены конструктивные принципы построения установок доводочного шлифования и утонения, двухзаходного разделения, лазерной обработки, диффузионной сварки пластин и присоединения кристаллов методом "флип-чип" для сборки изделий микросистемотехники. Приведены результаты исследований и разработки.

Ключевые слова: микросистемотехника, абразивный инструмент, утонение полупроводниковых пластин, разделение пластин на кристаллы, формирование отверстий лазером, диффузионная сварка, монтаж кристаллов, "флип-чип"

Введение

В отличие от микроэлектроники, где основным технологическим материалом является кремний, в микросистемотехнике наряду с кремнием широко используется множество пьезоэлектрических материалов: ниобат лития, танталат лития, лангасит, лангата, а также различные сорта кварца. Эти материалы обладают физико-химическими свойствами, затрудняющими их обработку традиционными методами и манипулирование ими в процессе производства изделий микросистемотехники (МСТУ): они хрупки, разрушаются при незначительных тепловых воздействиях, некоторые имеют пиротехнический эффект. Это выдвигает особые требования к оборудованию для проведения сборочных операций МСТУ. Для создания такого оборудования в рамках научно-технической программы Союзного

государства "Микросистемотехника" выполняется следующий комплекс опытно-конструкторских работ (ОКР):

* ОКР "Разработка и создание специального технологического оборудования и абразивного инструмента для доводочного шлифования подложек и утонения прецизионных элементов конструкции МСТУ";

* ОКР "Разработка и создание специального технологического оборудования и микроабразивного инструмента для двухзаходного разделения подложек МСТУ";

* ОКР "Разработка и создание лазерного оборудования для формирования сквозных отверстий в кристаллах без изменения физических свойств кристалла и лазерной обработки подложек МСТУ";

* ОКР "Разработка и создание установки монтажа кристаллов по технологии "флип-чип" применительно к сборке МСТУ";

* ОКР "Разработка и создание оборудования для диффузионной сварки композиционных материалов с использованием низкотемпературного боросиликатного стекла".

Ниже приведены результаты исследований и разработки специального технологического оборудования для сборки изделий микросистемотехники.

Установка доводочного шлифования и утонения ЭМ-2080

Установка состоит из станка шлифовки и стойки управления. Станок шлифовки представляет собой прецизионный вертикально-шлифовальный станок с предметным столом на аэростатических опорах и с двумя вертикально-перемещаемыми электрошпинделями, на которых закреплены абразивные инструменты с крупнозернистой и мелкозернистой фракциями алмазного порошка. Обработка пластин ведется двухстадийно: сначала крупнозернистым, затем — мелкозернистым инструментом. Основание является несущей конструкцией станка шлифовки и предназначено для размещения основных узлов установки. Основание представляет собой сварной каркас, на котором через виброизолирующие элементы крепится плита из габбро-диабазы. На плите расположены две стойки с приводами вертикального перемещения каретки электрошпинделя. На валах электрошпинделей через фланец закреплены инструменты.

Вертикальное перемещение кареток осуществляется по рельсовым роликовым направляющим через ролико-винтовую передачу с мелким шагом ($P = 1$ мм) от серводвигателя. В качестве датчиков обратной связи по оси Z используются оптические линейки с дискретностью 0,5 мкм.

На плите из габбро-диабазы также закреплен предметный стол. На столе установлены рабочие

столики (позиции) под конкретный размер обрабатываемых пластин. Способ удержания обрабатываемых пластин — вакуум. Каждая позиция на столе со своим подводом вакуума. Привод предметного стола — прямой от серводвигателя и обеспечивает частоту вращения до 60 об/мин. Привод осуществляется через компенсирующую центрирующую пластину из пружинной стали, через которую передается вращение верхней части стола на упорном аэростатическом подшипнике. Пластина из пружинной стали выполняет функцию развязки между обычными радиально-упорными подшипниками стола и упорным аэростатическим подшипником. Аэростатический подшипник обеспечивает качественную обработку хрупких материалов.

Результаты обработки танталата лития [1] представлены в таблице.

Дислокации и дефекты поверхностного слоя подложки напрямую влияют на качество топологических слоев МСТУ и ухудшают их эксплуатационные свойства.

Перспективным способом получения высококачественной поверхности подложек МСТУ из твердых хрупких кристаллических материалов нанометрового рельефа является удаление поверхностного слоя в режиме квазипластичности [2]. Технология квазипластичной обработки твердых материалов основана на обеспечении механического воздействия на обрабатываемую поверхность материала при значении подачи абразивного инструмента, составляющей доли микрометра на ход. При этом поверхностный слой твердых хрупких материалов проявляет пластические свойства, и преобладающим механизмом становится не хрупкое разрушение, а квазипластичное удаление поверхностного слоя материала. Однако, как показано в работе [3], основная часть энергии, затраченной на квазипластичное удаление поверхностного слоя материала, расходуется в поверхностном слое, что приводит к его значительному перегреву, и критическая температура означает возможность распространения дефектов в глубь обрабатываемого материала. Поэтому в установке наряду с обеспечением субмикронной вертикальной подачи инструмента значительное внимание уделено системе охлаждения поверхности обрабатываемых подложек.

Шероховатость обработанной поверхности танталата лития в зависимости от зернистости инструмента

Зернистость инструмента, мкм	Шероховатость, мкм	
	Ra	Ra max
80/120	0,269	2,877
20/30	0,089	0,745
8/20	0,018	0,178
4/4	0,011	0,127

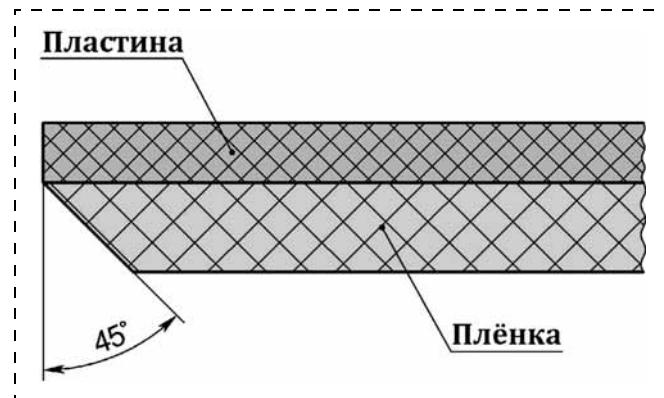


Рис. 1. Обрезка пленки под углом 45° к поверхности пластины

Наши исследования по оптимизации формы инструмента показывают, что для снижения сколов по краям пластины, необходимо выполнить скругление радиусом $R \approx 0,5$ мм внешней режущей кромки инструмента. Это позволяет осуществить плавное врезание инструментом в пластину и способствует уменьшению сколов по краям пластины.

Еще один фактор, который оказывает влияние на образование сколов по краям пластины, — это форма края адгезионной пленки, которая обрезана заподлицо с кромкой пластины. Лучшие результаты получены при обрезке пленки под углом 45° к поверхности пластины (рис. 1).

Такая обрезка пленки способствует меньшему подъему края пленки, который имеет место вследствие подсоса вакуумом охлаждающей жидкости с отходами обработки.

Таким образом, скругление внешней кромки инструмента и обрезка пленки под углом позволяют снизить повреждения по периферии пластины.

Одной из существенных проблем при обработке полых структур является поломка пластины от вертикальной составляющей силы резания. В основном это наблюдается для тех полостей, грани которых оказываются параллельными следам от режущей кромки инструмента.

Следует отметить, что на предлагаемом оборудовании реализован метод шлифования, при котором следы (риски) от инструмента почти параллельны друг другу. Поэтому при обработке полых структур достаточно сориентировать обрабатываемые пластины на вакуумных столиках таким образом, чтобы следы (риски) от инструмента не были параллельны сторонам полостей. Это позволит снизить вероятность поломки пластин.

Полуавтомат разделения подложек ЭМ-2115

Для повышения эксплуатационных характеристик МСТУ большое значение имеет формирование фасок по периметру кристалла разделяемой подложки. Для осуществления формирования фасок и

разделения подложки на кристаллы применяют установки, обеспечивающие двухзаходное разделение подложек на кристаллы.

Задача формирования фасок по периметру полупроводниковых кристаллов решается путем применения абразивных режущих кругов (дисков) с *V*-образной профилированной рабочей частью с полным углом профиля 60° и 90°.

Обработка пластин ведется двухстадийно: сначала инструментом для получения клиновидного реза, а потом инструментом для получения сквозного плоского реза.

Полуавтомат представляет собой прецизионный станок резки с предметным столом на аэро-статических опорах и с двумя горизонтально- и вертикально-перемещаемыми электрошпинделями, на которых закреплены абразивные инструменты для получения клиновидного и плоского резов.

Основание является несущей конструкцией станка резки и предназначено для размещения основных узлов полуавтомата. Основание представляет собой сварной каркас, на котором через виброизолирующие элементы закреплена плита из габбро-диабазы.

На плите располагаются две стойки, на которых закреплен привод горизонтального перемещения приводов вертикального перемещения электрошпинделя. На валу каждого электрошпинделя крепится алмазный инструмент. Вертикальное и горизонтальное перемещение каждого электрошпинделя осуществляется по рельсовым шариковым направляющим через шарико-винтовую передачу с шагом ($P = 5$ мм) от шагового двигателя. В качестве датчиков обратной связи по оси *Z* используются оптические линейки с дискретностью 0,5 мкм.

Столик для удержания обрабатываемых пластин выполнен с вставкой с размерами пор около 30 мкм. Это позволяет надежно и аккуратно (без внесения напряжений) удерживать рамочный носитель с обрабатываемой пластиной вакуумом. При снятии обработанной пластины вероятность поломки снижается, а усилие удержания рамочного носителя с обрабатываемой пластиной увеличивается.

Для минимизации тепловых изменений длины вала электрошпинделя в конструкции полуавтомата предусмотрены термодары, измеряющие температуру охлаждающей жидкости (воды) на выходе каждого электрошпинделя. При выходе температуры охлаждающей жидкости за установленные пределы автоматически увеличивается расход охлаждающей жидкости, что приводит к уменьшению температуры на электрошпинделе и возврате ее в установленный коридор.

Из возможных вариантов построения установки двухзаходного разделения подложек МСТУ выбран вариант встречного расположения электрошпинделей. При прочих равных условиях он

обеспечивает более высокую производительность, так как осуществляется параллельное разделение подложки МСТУ двумя инструментами.

Кинетику процесса резания при разделении пластин на кристаллы алмазными дисками можно сравнить с микрошлифованием. При выполнении этой операции необходимо обеспечить требуемый уровень качества кристаллов, оцениваемый несколькими показателями: точностью размеров, чистотой поверхности боковых граней, значением сколов на поверхности и шириной реза.

Эти показатели определяются, с одной стороны, конструкцией и техническими характеристиками оборудования и инструмента, с другой стороны, — выбором технологических режимов обработки.

Ведущими фирмами, которые производят бескорпусные алмазные режущие диски на полимерной основе, являются *Disco* (Япония) и *Kulicke & Soffa* (США). Анализ рекомендаций по применению инструмента этих фирм и собственный многолетний опыт по разделению подложек изделий электронной техники позволили выработать следующие требования к материалу инструмента для разделения подложек МСТУ:

- марка алмазного порошка — АС 32, АС 50;
- зернистость — 4/2...20/14 мкм;
- основная фракция — не менее 80 %;
- коэффициент формы — не более 1,2;
- массовая доля примесей в порошке — не более 0,5 %;
- массовая доля влаги в порошке — не более 0,2 %.

Для придания лезвию диска всех необходимых свойств и обеспечения требований, предъявляемых к его функциональному назначению, применены следующие решения:

- использование синтетического алмазного микропорошка высокой режущей способности, полученного с помощью технологии синтеза узкого требуемого диапазона зернистости;
- упрочнение связки включением борсодержащей добавки;
- упрочнение связки включением ультрадисперсных алмазов (УДА).

Исследованиями было установлено [4], что включение УДА в состав композиционного электролитического покрытия (КЭП) увеличивает твердость покрытия пропорционально концентрации ультраалмазов в электролите никелирования (рис. 2). В то же время, при концентрации УДА в электролите 0,2 г/л и более наблюдается эффект "вытеснения" частицами УДА зерен микроалмаза АСН в обратной зависимости, т. е., чем больше концентрация УДА в электролите, тем меньше осаждаются зерен микроалмаза. Это недопустимо, поскольку уменьшение количества зерен микроалмаза, выполняющих режущую функцию, в покрытии отрицательно влияет на режущую способность инстру-

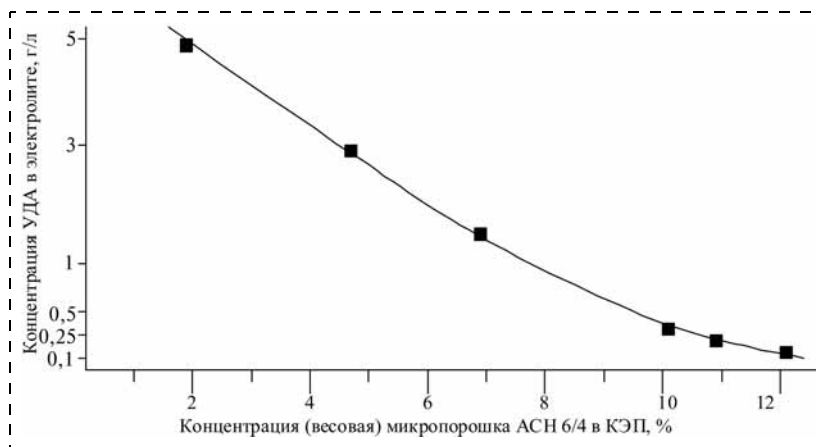


Рис. 2. Зависимость концентрации микроалмаза в КЭП от концентрации УДА в электролите никелирования

мента. Результаты испытаний показывают, что наиболее оптимальной концентрацией УДА в электролите для лезвия диска по соотношению основных эксплуатационных показателей "ширина реза — стойкость" является значение 0,15...0,2 г/л.

По результатам исследований проведена разработка конструкции и технологического процесса изготовления алмазных режущих дисков с V-образной профилированной рабочей частью лезвия (угол профиля 60° и 90°) для получения клиновидного реза и дисков с поперечным сечением прямоугольной формы для получения плоского реза с синтетическими алмазными микропорошками диапазона зернистости 4/2...20/14 мкм для производственного и высококачественного разделения полупроводниковых пластин и других подложек МСТУ на кристаллы с формированием фасок по периметру кристалла.

Установка лазерной обработки ЭМ-290

Установка состоит из следующих основных частей:

- устройство позиционирования;
- лазерное устройство, в состав которого входят лазер, состоящий из излучателя, блоков питания и охлаждения, а также оптико-механическое устройство;
- система управления на базе компьютера типа IBM PC;
- основание с защитными кожухами и системой блокировок;
- система фильтровентиляционная (ФВУ).

В установке использован пикосекундный лазер DPSS с программно задаваемыми параметрами лазерного излучения, генерирующий излучение с ультракороткой длительностью импульса (~10 пс), что позволяет проводить размерную лазерную обработку материалов МСТУ в режиме "холодной абляции" без изменения их физических свойств. На

рис. 3 (см. третью сторону обложки) представлена сравнительная схема [5] воздействия сфокусированного пикосекундного излучения и излучения с более длительным импульсом (наносекундный, микросекундный диапазон).

Приведенная на рис. 3 (см. третью сторону обложки) схема отражает преимущества обработки материала ультракороткими импульсами лазерного излучения. К таким преимуществам относятся отсутствие зоны термического влияния (HAZ — *heat affected zone*), ударной волны, микротрещин, оплавленных зон и выплесков, теплового повреждения поверхностных слоев материала. Для улучшения гладкости стенок обрабаты-

ваемых отверстий применяется четвертьволновая пластина, изменяющая вид поляризации лазерного излучения от линейной до круговой, или вращающаяся полуволновая пластина для получения случайной поляризации.

Управление установкой осуществляется с помощью блока управления РС. Рабочая программа создается с использованием графического редактора AutoCAD.

Применяемая в составе установки оптико-телевизионная система позволяет добиться многократного увеличения изображения. На экран монитора выводится изображение объекта с суммарным электронным и оптическим увеличением в диапазоне от 40 до 500 крат, что способствует снижению погрешности распознавания и достижению высокой точности процесса лазерной обработки.

Координатная система обеспечивает перемещение пластины в рабочую зону установки, совмещение и ориентацию пластины с нулевыми реперами из DXF-файла.

Механизм перемещения выполняет перемещение пластины, закрепленной на столике посредством вакуума. Механизм перемещения имеет два параллельных магнитных трака напротив друг друга с подвижной частью между магнитными поверхностями. Эта подвижная часть поддерживается в траке механической направляющей системой. Магнитный трак — модульный, что позволяет осуществлять механическое наращивание до нужной длины, определяемой конструкцией оборудования. Также при необходимости можно заблокировать и подвижные части для увеличения тягового усилия. Подвижная часть двигателя представляет собой трехфазную катушку без сердечника, залитую теплопроводящей эпоксидной смолой. Двигатель позволяет развивать скорость до 5 м/с и имеет высокое тяговое усилие, до 2000 Н. Точность перемещения и повторяемость определяются точностными пара-

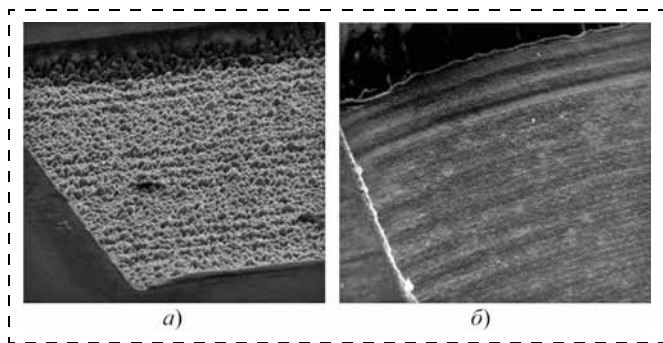


Рис. 4. Изображение фрезерованной поверхности кремния:
 а — обработки единичным импульсом; б — обработка пятью импульсами с разделением 20 нс

метрами линейного энкодера SW-320-3 (Fagor), применяемого в приводе.

ФВУ состоит из трех блоков: вентиляторного, фильтровального и бункера-накопителя, соединенных в единую конструкцию.

Отработка технологии сверления подложек МСТУ проводилась с использованием лазерного устройства, собранного на базе пикосекундного лазера Super Rapid (Lumera, Германия).

На рис. 4 и 5 (см. третью сторону обложки) приведены изображения образцов, обработанных указанным лазером.

На рис. 5 F — частота следования импульсов; P_E — мощность излучения; V — скорость обработки; N — число проходов.

После лазерной обработки для удаления шлаков проведена протирка поверхности салфеткой, смоченной изопропиловым спиртом. Сколы и микротрещины не наблюдаются. Качество лазерной обработки хорошее.

Использование режима *Burst mode* (режим пачек) позволяет уменьшить шероховатость поверхности и увеличить съем материала до 8 раз.

Установка для монтажа кристаллов по технологии "флип-чип" ЭМ-4336

Сборка по технологии "флип-чип"[6] представляет собой монтаж перевернутых кристаллов электронных компонентов (отсюда "flipped" — перевернутый) на подложки, монтажные платы или пластины с помощью проводящих столбиковых выводов на контактных площадках (бампов), что позволяет создавать непосредственное электрическое соединение между компонентами.

На установке могут быть реализованы следующие методы монтажа кристаллов:

- бесфлюсовая пайка;
- пайка с флюсованием (с нанесением флюса методом окунания (погружения));

- монтаж кристалла с помощью изотропного (проводящего) адгезива с нанесением адгезива методом окунания (погружения));
- монтаж кристалла с помощью анизотропного (непроводящего) адгезива (предварительно нанесенного).

В состав установки входят следующие основные составные части:

- устройство совмещения и присоединения компонентов;
- тумба управления;
- система технического зрения.

Две оптико-телевизионные системы, включающие микроскоп и ПЗС-камеру, стационарно закреплены на кронштейне устройства совмещения и присоединения компонентов. В начале цикла они выведены за пределы рабочей зоны. Привод ХУ, входящий в состав привода ХУф, подводит на рабочую позицию кассеты с кристаллами, расположенными "бампами" вниз. Инструмент посредством подачи вакуума захватывает кристалл из кассеты. Устройство присоединения кристаллов, входящее в устройство совмещения и присоединения компонентов, поворачивает инструмент с кристаллом на 180°. Кристалл оказывается повернутым "бампами" вверх. Привод ХУ выводит кассеты с кристаллами из рабочей зоны и перемещает на рабочую позицию нагревательный стол с расположенными на нем подложками. На рабочую позицию подводятся микроскопы. Система "технического зрения" одного из них фиксирует расположение "бампов" на кристалле и передает его на монитор. Система "технического зрения" другого микроскопа "видит" расположение контактных площадок на подложке и также передает его на монитор. Совмещение присоединяемых компонентов происходит путем корректировки положения подложки посредством перемещения с помощью приводов ХУ и ф. Чтобы свести погрешность позиционирования к минимуму, перед тем, как использовать установку в рабочем режиме, проводится наладка ее оптической системы с помощью фотошаблона. После осуществления совмещения блок микроскопов удаляется из рабочей зоны по координатам X , Y . Механизм вертикальных перемещений поворачивает инструмент с кристаллом на 180° (кристалл "бампами" вниз теперь расположен вдоль одной оси Z с контактной площадкой подложки) и, двигаясь вниз по координате Z , совмещает кристалл, находящийся на подогретом инструменте, с нагретой подложкой (пластиной). Нагрев подложки осуществляется с помощью нагревателя, встроенного в нагревательный стол, на котором находится подложка (пластина). Температуру нагрева контролирует датчик контроля температуры с погрешностью $\pm 3^\circ\text{C}$. Подача вакуума на инструмент сменяется подачей сжатого воздуха

под заданным давлением. Происходит процесс присоединения компонентов.

Высокая точность позиционирования данной конструкции реализована за счет применения привода ХУ, управляемого синхронными линейными двигателями и обеспечивающего погрешность позиционирования не более ± 8 мкм на весь ход привода и не более ± 1 мкм на ходе (2×2) мм, и высокоточного привода поворота подложки (пластины) по координате ϕ , а также благодаря тому, что инструмент с присоединяемым компонентом после совмещения элементов компонента и подложки перемещается относительно подложки только в двух направлениях: поворот на 180° и опускание по координате Z . Поскольку имеется высокая повторяемость действий, это не оказывает существенного влияния на точность позиционирования. Применяемая оптическая система позволяет добиться многократного увеличения изображения (предполагаемая кратность оптико-телевизионной системы $300\text{—}500\times$), что способствует снижению погрешности распознавания и достижению высокой точности присоединения. Расчет и анализ достижимой точности совмещения компонентов по предлагаемой схеме построения установки подтвердили точность присоединения ± 10 мкм.

Высокая производительность установки — не менее 500 монтажа кристаллов в час, обеспечивается быстроедействием привода ХУ (его скорость составляет не менее 0,5 м/с).

Отличительными особенностями конструкции является наличие двух телевизионных микроскопов, позволяющих "видеть" одновременно оба совмещаемых объекта и отсутствие взаимных перемещений совмещаемых объектов по координатам X , Y , ϕ в процессе присоединения.

Установка диффузионной сварки подложек МСТУ ЭМ-4044

В состав установки входят следующие основные составные части:

- транспортное устройство;
- рабочая камера;
- устройство загрузки;
- блок управления электро- и пневмооборудованием.

Транспортное устройство с совмещенными пластинами устанавливают вручную на устройство загрузки, которое с помощью координатного стола перемещает транспортное устройство в вакуумную камеру устройства сварки.

Привод Z осуществляет снятие транспортного устройства с устройства загрузки и перемещение внутри камеры на позицию сварки. Устройство формирования вакуума и напуска газа в камеру формирует и поддерживает остаточное давление в

камере. Головка нагружения обеспечивает фиксацию пластин от смещения относительно друг друга и осуществляет передачу усилия сжатия. Устройства перемещения прижимов и щупов освобождают свариваемые пластины от щупов и прижимов транспортного устройства перед непосредственным процессом сварки. Нагревательные столы, расположенные соответственно в головке нагружения и устройстве сварки, осуществляют раздельный нагрев верхней и нижней пластин до температуры от $+50$ до $+500^\circ\text{C}$.

Температуру нагрева контролируют термодатчики с погрешностью $\pm 1,5^\circ\text{C}$. С помощью блоков подготовки газа и воздуха и блоков электроуправления, входящих в состав стола электропневмооборудования, осуществляется контроль и поддержание параметров режима сварки.

Конструкция вакуумной камеры и ее объем выбраны исходя из того, что размеры камеры должны быть достаточными для размещения транспортного устройства со свариваемыми изделиями, нижнего нагревательного столика и головки нагружения, а также для минимизации времени откачки. Особым требованием, предъявляемым к конструкции вакуумной камеры, является полная герметичность. Для этого необходимо применение газонепроницаемых материалов, высокая вакуумная плотность сварных швов, а также тщательная обработка внутренних поверхностей камер.

Материал, из которого изготавливается камера, должен обеспечивать:

- наибольшую вакуумную плотность даже при малых толщинах;
- наименьшее газоотделение даже при повышенных температурах;
- хорошую механическую обрабатываемость и свариваемость различными способами электро-сварки;
- коррозионную стойкость.

Для выполнения данных требований и минимизации газовыделения, а также обеспечения достаточной механической и термической прочности при изготовлении составных частей камеры используется коррозионно-стойкая сталь 12Х18Н10Т.

При конструировании камеры предпочтение было отдано осесимметричным конструкциям, поверхности которых образованы телами вращения. Это относится и к присоединительным патрубкам. Назначение установки, а также конструктивные соображения определяют форму не только камеры, но и обечайки. Они могут быть цилиндрическими, коническими, коробчатыми, сферическими или эллиптическими. В камере использована цилиндрическая обечайка. Данный тип отличается простотой изготовления и рациональным расходом материала. Предпочтение отдано вертикальному типу исполнения обечайки.

Основным элементом головки нагружения является сильфон, выполняемый из коррозионно-стойкой стали, к которому герметично через соединения типа "ласточкин хвост" прикреплен верхний нагревательный стол, контактирующий контактным диском с поверхностью подложек. Сильфон, представляющий собой кинематическую развязку, обеспечивает равномерность распределения нагрузки по всей поверхности соединяемых изделий.

Давление, оказываемое сильфоном на свариваемые подложки, представляет собой дифференциальное давление между создаваемым давлением внутри сильфона и давлением, создаваемым устройством формирования вакуума и напуска газа в вакуумной камере.

Данное оборудование предназначено для сварки неметаллических подложек МСТУ в следующем сочетании: кремний—кремний, кремний—стекло, стекло—стекло, пьезоэлектрик—стекло и пьезоэлектрик—пьезоэлектрик.

Особо перспективным является использование легкоплавких боросиликатных стекол [7], снижающих температуру сварки до 400...450 °С, а также улучшенная до $\pm 1,5\%$ равномерность температуры в рабочей зоне сварки, значительно повышающая выход годной продукции.

Заключение

Разработан комплект оборудования для сборки изделий микросистемотехники, обеспечивающий возможность обработки различных материалов: кремния, ниобата лития, танталата лития, лангсита, лангатата, кварца. Специальный абразивный инструмент и оригинальная технология шлифования на установке ЭМ-2080 позволяют обрабатывать полые структуры МСТУ. С помощью профильного алмазного микроинструмента на двухшпиндельной установке разделения ЭМ-2115 обеспечивается формирование фасок 30° или 45° на

каждом кристалле и сквозное разделение за одну установку пластины. Изменение последовательности выполнения операций — предварительное надрезание пластины с последующим утонением — позволяет получить минимальную толщину кристалла 30...50 мкм. Пикосекундный лазер установки ЭМ-290 формирует сквозные отверстия, углубления в различных материалах подложек МСТУ без теплового воздействия на изделие, практически исключая загрязнение обрабатываемой поверхности. В совокупности с установкой присоединения кристаллов методом "флип-чип" ЭМ-4336 комплект оборудования обеспечивает 3D-сборку МСТУ методом штекирования. Установка диффузионной сварки ЭМ-4044 дополняет комплект оборудования, позволяя работать как с отдельными кристаллами (метод "die-to —wafer"), так и с неразделенными пластинами (метод "wafer-level-packaging").

Список литературы

1. http://www.disco.jp/eg/products/grinding_wheel/index.html
2. Теплова Т. Б. Исследование возможности обработки хрупких твердых кристаллических материалов электронной техники в режиме квазипластичности для совершенствования качества обрабатываемой поверхности // Нано- и микросистемная техника. 2008. № 2. С. 45—47.
3. Соловьев В. В. Модель прецизионной обработки твердых хрупких кристаллических материалов с получением нанометрового рельефа поверхности // Нано- и микросистемная техника. 2010. № 12. С. 10—14.
4. Губаревич Т. М., Чернухо Л. Е., Рошня А. И. Алмазно-гальванический инструмент на никелевой связке, упрочненной ультрадисперсными алмазами // Инструментальный світ. 2001. № 3. С. 21—24.
5. Karnakis D. M., Krawles M. R. H., Petkov P. V., Dobrev T., Dinov S. S. Surface integrity optimisation in ps-laser milling of advanced engineering materials // Proc. of the Fourth International WLT-Conference on Lasers in Manufacturing 2007, Munich, June 2007.
6. <http://www.flipchips.com/tutorial47.html>
7. Riley G. A. Wafer-level hermetic cavity packaging // Advanced Packaging. May 2004. V. 13, h. 5. P. 21—24.

УДК 681.518.5

А. Н. Михайлов, д-р техн. наук, нач. отделения,
e-mail: an_mikhailov@mail.ru,

С. А. Берлик, канд. техн. наук, нач. отдела,
e-mail: s.berlik@mail.ru,

Е. А. Михайлов, инженер 1-й кат., аспирант,
e-mail: nacles@mail.ru,
ОАО "Авангард", г. Санкт-Петербург

МЕТОДОЛОГИЯ АВТОМАТИЗИРОВАННОГО КОНТРОЛЯ ПАРАМЕТРОВ ДАТЧИКОВ ИЗДЕЛИЙ МИКРОСИСТЕМОТЕХНИКИ

Поступила в редакцию 24.05.2012 г.

Рассмотрены вопросы автоматизации разработки тестовых программ и их применения для контроля параметров датчиков изделий микросистемотехники на основе поведенческих моделей компонентов, входящих в состав датчиков. Поведенческие модели компонентов представляют собой тексты программных модулей, написанные на высокоуровневом языке описания аппаратуры (Hardware Description Language — HDL).

Ключевые слова: контроль параметров, датчик, поведенческие модели, тестовая программа

Датчик как изделие микросистемотехники — это законченное изделие на основе одного или нескольких чувствительных элементов (ЧЭ). В состав датчиков, помимо ЧЭ, могут входить устройства усиления сигнала, линеаризации, автокалибровки, аналого-цифрового преобразования, интерфейса и другие, в зависимости от назначения датчика [1].

Датчики являются неотъемлемым элементом систем измерения, сигнализации, регулирования, управления устройствами или процессами. Датчики преобразуют контролируемую величину (давление, температуру, расход, концентрацию, частоту, скорость, перемещение, напряжение, электрический ток и т. п.) в сигнал (электрический, оптический, пневматический), удобный для измерения, передачи, преобразования, хранения и регистрации информации о состоянии объекта измерений.

Сфера применения различных датчиков на сегодняшний день достаточно велика. Это бытовая аппаратура (термометры, тонометры, системы GPS),

автомобильное оборудование (датчики топлива, датчики удара, тормозные датчики, датчики положения окон), промышленные и медицинские приборы (датчики положения клапанов, системы контроля температуры, ЭКГ), системы обеспечения безопасности жизнедеятельности (газовые датчики, датчики деформаций и другие).

В настоящее время разработчики датчиков изделий микросистемотехники не уделяют должного внимания вопросам разработки тестовых программ для автоматизированного контроля их параметров, и контроль в большинстве случаев проводится с использованием "ручных" технологий. Это приводит к большим временным и финансовым затратам и не обеспечивает должного качества контроля.

Таким образом, задача автоматизации процесса контроля параметров датчиков представляется важной и актуальной.

Между тем существует возможность автоматизированного построения тестовых программ для контроля параметров датчиков еще на этапе их разработки. Такая задача решается с использованием системы автоматизированного проектирования (САПР) тестовых программ [2].

Исходными данными для работы САПР являются:

- данные в формате NetList — информация о связях между компонентами датчика и список этих компонентов;
- модель функционирования датчика, построенная на основе SPICE-моделей компонентов датчика;
- требования технических условий.

Схема формирования тестовых программ для контроля параметров датчиков представлена на рисунке.

Автоматизированное построение тестов осуществляется на основе модели функционирования датчика. При этом модель представляется в виде графа, в котором вершинами являются SPICE-модели компонентов датчика. Информация о ребрах графа берется из файлов в формате NetList.

На входы датчика, представленного его моделью, подаются сигналы в соответствии со значениями, указанными в технических условиях, или требованиями, заданными пользователями. Результатом автоматизированного построения тестов является программа на языке C для среды

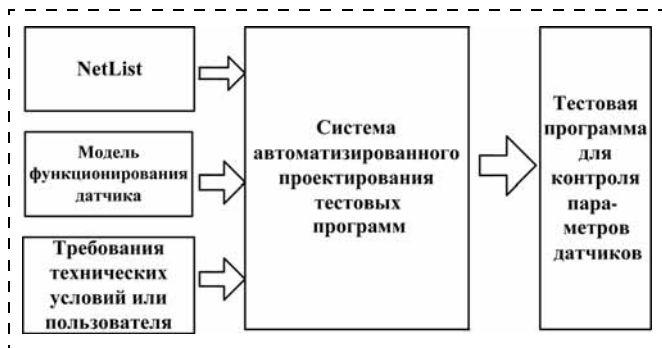


Схема формирования тестовых программ для контроля параметров датчиков

LabWindows/CVI производства компании *National Instruments*.

Файл схематики NetList формируется из схемы электрической принципиальной в процессе трассировки печатной платы и представляет собой список компонентов схемы и связей между ними.

Модель функционирования датчика в общем случае описывается системами дифференциальных уравнений, в зависимости от сложности схемы электрической принципиальной датчика [3].

В качестве метода составления уравнений цепи применяется модифицированный метод узловых напряжений (ММУН). В методе используется закон токов Кирхгофа (ЗТК): сумма токов в узле равна нулю [4].

Описание поведения схемы представляется в виде следующей системы уравнений:

$$\frac{d}{dt} \mathbf{Q}_{\text{нл}}(\mathbf{X}(t)) + \mathbf{B}_{\text{лин}} \frac{d}{dt} \mathbf{X}(t) + \mathbf{I}_{\text{нл}}(\mathbf{X}(t)) + \mathbf{A}_{\text{лин}} \mathbf{X}(t) = \mathbf{f}(t),$$

где $\mathbf{X}(t)$ — вектор переменных состояния размерности N ; $\mathbf{Q}_{\text{нл}}(\mathbf{X}(t))$ — вектор зарядов нелинейных емкостей $\mathbf{Q}_{C_i}(\mathbf{V}(t), \mathbf{I}(t))$; $\mathbf{I}_{\text{нл}}(\mathbf{X}(t))$ — вектор токов нелинейных резистивных элементов; $\mathbf{B}_{\text{лин}}$ — матрица размером $N \times N$ линейных емкостей; $\mathbf{A}_{\text{лин}}$ — матрица размером $N \times N$ линейных резистивных элементов и инцидентий токов элементов; $\mathbf{f}(t)$ — вектор значений независимых источников напряжения и тока.

В качестве переменных вектора состояний $\mathbf{X}(t)$ используются:

- 1) потенциалы узлов цепи V_i , $i = 1 \dots N_{\text{узл}} - 1$, кроме базисного узла с нулевым потенциалом;
- 2) токи индуктивностей I_{L_i} , $i = 1 \dots N_{\text{инд}}$;
- 3) токи независимых источников напряжения I_{E_i} , $i = 1 \dots N_E$;
- 4) токи моделей полупроводниковых элементов:
 - диода I_{D_i} , $i = 1 \dots N_D$;
 - полевого транзистора I_{J_d} , I_{J_s} , $i = 1 \dots N_J$;

- арсенид-галлиевого транзистора I_{B_d} , I_{B_s} , $i = 1 \dots N_B$;
- биполярного транзистора I_{Q_c} , I_{Q_e} , $i = 1 \dots N_Q$;
- МОП-транзистора I_{M_d} , I_{M_s} , I_{M_b} , $i = 1 \dots N_M$;

5) токи управляемых источников напряжения ИНУН, ИНУТ.

Токи нелинейных емкостей включены в уравнения как производные зарядов по времени:

$$I_{C_i} = \frac{\partial Q_{C_i}(\mathbf{V}(t), \mathbf{I}(t))}{\partial t}, \quad i = 1 \dots N_C.$$

Токи линейной емкости заменяются следующими выражениями:

$$I_{C_i} = C_i \frac{\partial (V_{C_{i1}} - V_{C_{i2}})}{\partial t}, \quad i = 1 \dots N_{C_{\text{лин}}}.$$

Ток нелинейных резисторов включен в уравнения в виде нелинейной характеристики элемента:

$$I_{R_i} = f_i(\mathbf{V}, \mathbf{I}), \quad i = 1 \dots N_R.$$

Ток линейных резисторов заменяется в уравнениях согласно закону Ома:

$$I_{R_i} = \frac{V_{R_{i1}} - V_{R_{i2}}}{R_i}, \quad i = 1 \dots N_{R_{\text{лин}}}.$$

Следует отметить, что модель функционирования датчика создается автоматизированным способом с помощью пакета схемотехнического моделирования, например программного пакета CoventorWare [5].

В требованиях технических условий или пользователя указываются данные о входных воздействиях и реакциях датчика на эти воздействия (выходные данные).

Автоматизированный контроль параметров датчиков осуществляется следующим образом.

1. В процессе разработки схемы электрической датчика формируется файл схематики NetList.

2. На основе разработанной схемы датчика с помощью пакета схемотехнического моделирования разрабатывается модель функционирования датчика.

3. Файл схематики NetList, модель функционирования датчика и требования пользователя или требования технических условий на датчик подаются в систему автоматизированного построения тестовых программ.

4. Система автоматизированного построения тестовых программ после обработки исходных данных формирует тест для контроля параметров датчика, который определяет последовательность по-

дачи тестовых воздействий, их значения и параметры реакций датчика на эти воздействия.

5. Контролируемый датчик подключается к диагностическому оборудованию, на котором запускается и выполняется разработанный тест.

6. В процессе тестового контроля на вход датчика подаются тестовые воздействия и принимаются реакции датчика на эти воздействия.

7. По результатам тестового контроля автоматически проводится сравнительная оценка выходных параметров датчика, полученных в процессе моделирования, и действительных значений выходных сигналов датчика, полученных при выполнении теста.

8. По результатам сравнительной оценки принимается решение о соответствии параметров датчика требованиям качества.

В заключение отметим, что задача автоматизированного контроля параметров датчиков назрела уже давно ввиду их массового использования не только в промышленности, но и в быту. Одной из ключевых проблем при таком подходе является создание систем автоматизированного проектирования тестовых программ для аналоговых и цифро-

вых датчиков, позволяющих качественно решать задачу проектирования тестовых программ.

Предложенный способ контроля параметров датчиков позволит существенно сократить временные и финансовые затраты, а также существенно повысить качество контроля. Все эти показатели в современных условиях являются главными факторами конкурентоспособности не только продукции или предприятия, но и страны в целом.

Список литературы

1. Шубарев В. А. Микросистемотехника. Инновационное направление развития электроники // ЭЛЕКТРОНИКА: Наука, Технология, Бизнес. 2010. № 5. С. 98–109.

2. Немолочнов О. Ф., Усвятский А. Е., Звягин В. Ф., Голыничев В. Н. Промышленная система автоматизации проектирования тестов // УСИМ. 1981. № 5. С. 37–42.

3. Шелепин Н. А. Основные принципы создания SPICE-моделей микроэлектромеханических систем // Микросистемная техника. 2004. № 9. С. 30–35.

4. Евменов В. В., Лазаренко Н. И. Справочник по физике. Мозырь: Белый Ветер, 2006. 136 с.

5. Золотов Ю. Н., Тимошенко С. П., Шелепин Н. А. Применение комплексных методов проектирования в процессе разработки интегральных преобразователей механических величин // Нано- и микросистемная техника. 2007. № 3. С. 4–10.

УДК 681.586.773

А. Т. Галисултанов, инженер,
С. В. Дзюбаненко, нач. сект.,
В. С. Игнатьев, инженер,
Д. М. Силаков, канд. техн. наук, нач. сект.,
В. А. Калинин, канд. техн. наук, нач. отд.,
ОАО "Авангард", г. Санкт-Петербург,
e-mail: galisultanov@gmail.com

АКУСТОЭЛЕКТРОННЫЕ ДАТЧИКИ СИЛЫ В СИСТЕМАХ БЕЗОПАСНОСТИ ГИДРОАГРЕГАТОВ ГЭС

Поступила в редакцию 11.05.2012

Разработан акустоэлектронный датчик силы, предназначенный для контроля силовых воздействий на анкерные сваи и шпильки креплений крышек турбин гидроэлектростанций. Использование пьезоэлектрических чувствительных элементов позволяет улучшить точностные и эксплуатационные характеристики. Система контроля динамического состояния силоизмерительных шайб (СКДС-СИШ), построенная на этих датчиках, дает возможность осуществлять непрерывный контроль нагрузок, что повышает безопасность сложных технических объектов.

Ключевые слова: акустоэлектроника, ПАВ-резонатор, датчик силы, гидроэлектростанция

Введение

Принцип действия датчиков силы основан на изменении физических или электрических характеристик первичных преобразователей при внешнем силовом воздействии. Отличительной особенностью данного типа датчиков является возможность измерения состояния первичных преобразователей посредством электрических сигналов и интерпретация измеряемого силового воздействия универсальными электрическими параметрами: силой тока, напряжением или частотой. Датчики силы традиционно группируют по следующим видам:

- тензорезисторные;
- пьезоэлектрические;
- пьезорезонансные;
- струнные;
- оптоволоконные.

Существующие датчики для контроля нагрузок на узлы конструкций в большинстве имеют решение первичного чувствительного элемента в виде тензометрических резисторов и построенных на их основе мостовых схем измерения выходного сигнала. Достоинствами таких датчиков являются невысокая стоимость и налаженная технология их изготовления. К недостаткам можно отнести невысокий температурный диапазон и необходимость термокомпенсации.

Акустоэлектронный датчик силы

В результате анализа возможных вариантов построения датчика было принято решение о создании датчика, принцип действия которого основан на переотражении пассивным пьезоэлектрическим чувствительным элементом (ПАВ-резонатором) зондирующего частотно-модулированного сигнала считывателя. Максимальная эффективность переотражения происходит на резонансной частоте чувствительного элемента, которая прямо пропорциональна воздействующей на датчик деформации сжатия. Таким образом, частота переотраженного ответного сигнала датчика пропорциональна значению воздействующей на него деформации. Внешний вид силоизмерительной шайбы (СИШ) с чувствительными элементами, выполненными на базе пьезоэлектрических резонаторов на поверхностных акустических волнах, представлен на рис. 1.

СИШ состоит из силотрансформирующей шайбы, трех силочувствительных элементов на ПАВ, трех ВЧ кабелей.

Область применения изделия — измерение сил сжатия, действующих на элементы строительных конструкций объектов двойного назначения: анкерные сваи, подвергающиеся давлению со стороны опорных стен в грунтах, при контроле нагрузок в туннельных опорах, в гражданском строительстве и т. п.

Для монтажа ПАВ-резонатора в силоизмерительную шайбу применен адгезионный тип соединения — склеивание галлиевой диффузионно-отверждающейся пастой-припоем ДОПП М354 ТУ 1768-001-07518266-2009 [1–3].

Применение диффузионно-отверждающихся паст-припоев на основе галлия позволяет сочетать достоинства вакуум-плотного жесткого паяного соединения при относительно невысоких температурах пайки (125 °С) без формирования дополнительных слоев между резонатором и силоизмерительной шайбой. Механизм образования соединения с помощью галлиевой пасты-припоя основан



Рис. 1. Акустоэлектронный датчик силы СИШПАВ

на формировании интерметаллидов и в отличие от классических низкотемпературных припоев (ПОС-61, Розе, Вуда) не требует нагрева выше температуры солидус. Интерметаллиды занимают промежуточное место между металлами и керамиками как по типу химической связи, так и по свойствам. Интерметаллиды имеют лучшую обрабатываемость, чем керамики. Наряду с определенной пластичностью они сохраняют свою структуру и прочность при высоких температурах, обладают хорошими антикоррозионными и антифрикционными свойствами, в чем значительно превосходят обычные металлы.

Результаты расчета напряженно-деформированного состояния силоизмерительной шайбы и чувствительного элемента

Применение конечно-элементного компьютерного моделирования на этапе конструирования силоизмерительной шайбы позволило подобрать оптимальное расположение чувствительного элемента для достижения максимально возможной чувствительности датчика и рассчитать предельные нагрузки.

Внешний радиус силоизмерительной и подкладной шайб равен 68,5 мм. Толщина СИШ равна 22 мм, толщина подкладной шайбы — 4 мм, глубина установки чувствительного элемента — 4 мм. С внешней стороны силоизмерительной шайбы снимается лыска и выполняется глухое углубление, которое предназначено для установки ЧЭ.

На рис. 2 приведена твердотельная модель силоизмерительной, подкладной шайб и гайки для расчета напряженно-деформированного состояния. Схема нагружения СИШ имитирует крепеж крышки гидроагрегата. Усилие на шайбу передается с помощью гайки М90 (штатные гайки крепления крышки турбины гидроагрегата Саяно-Шушенской ГЭС).

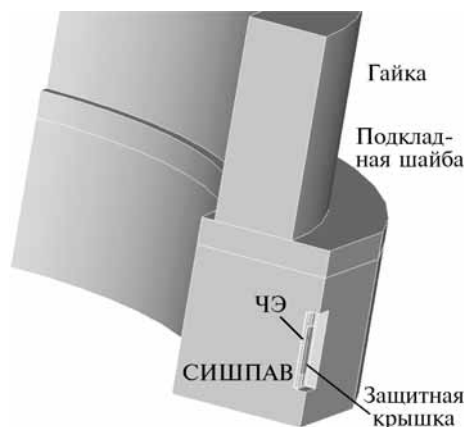


Рис. 2. Твердотельная модель силоизмерительной шайбы

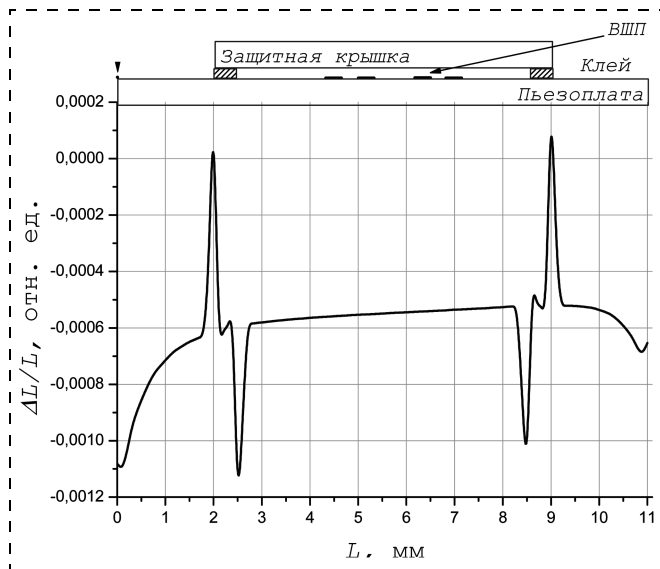


Рис. 3. Относительное удлинение вдоль поверхности пьезоплаты при нагрузке 100 тс

Максимальное эквивалентное по Мизесу напряжение σ_{M_max} при нагрузке $P = 150$ тс составляет 601 МПа (СИШ изготовлена из коррозионно-стойкой стали 40Х13) возникает в месте установки ЧЭ (чувствительный элемент из кварца ST-X среза). Поскольку в рамках линейной теории упругости напряжения растут пропорционально нагрузке, предельную нагрузку перехода к пластической деформации материала в точках максимума напряжений P_{lim} можно определить из следующего соотношения: $P_{lim} = \sigma_T / \sigma_{M_max} \cdot P$, где σ_T — предел текучести стали 40Х13 (940 МПа) [5], σ_{M_max} — максимальное эквивалентное по Мизесу напряжение при нагрузке P . Граница перехода силоизмерительной шайбы в область пластической деформации $P_{lim} = 235$ тс.

Максимальное значение первого главного напряжения в кварце при нагрузке 150 тс равно **51,6 МПа** и не превышает предела прочности кварца (80 МПа) [6].

Относительное удлинение вдоль центра поверхности пьезоплаты приведено на рис. 3. Пики на кривой связаны с влиянием клеевого соединения защитной крышки пьезоплаты. Относительное удлинение в центре пьезоплаты (точка расположения

топологии ВШП) равно $\Delta L/L \approx -5,4 \cdot 10^{-4}$ при нагрузке 100 тс.

Деформационные и температурные коэффициенты чувствительности кварца для различных срезов описываются формулой

$$f_j = f_{0j}(1 + \chi_\epsilon + \chi_{T1}\Delta T + \chi_{T2}\Delta T^2 + \chi_{T3}\Delta T^3), \quad (1)$$

где $\chi_\epsilon, \chi_{T1}, \chi_{T2}, \chi_{T3}$ — деформационные и температурные коэффициенты чувствительности, которые приведены в табл. 1 для различных срезов.

Преимуществом ST-среза кварца, выбранного для изготовления резонатора, является высокая деформационная чувствительность и нулевой температурный коэффициент. Центральная частота ПАВ-резонатора равна 434 МГц.

По полученным в результате расчета данным об относительном удлинении в пьезоплате определена зависимость приращения частоты резонатора от нагрузки. Чувствительность резонаторов $S = \Delta f / \Delta P = 3,3 \text{ кГц/тс}$.

Экспериментальное исследование СИШПАВ

Градуировка СИШПАВ проводилась на аттестованном прессе с использованием оснастки, имитирующей крепеж крышки гидроагрегата. Величиной, по которой определяются показания силоизмерительной шайбы, является сумма приращений значений резонансных частот Δf , которая определяется по формуле

$$\Delta f = \sum_{n=1}^3 (f_n - f_n^0), \quad (2)$$

где f_n — значение резонансной частоты; f_n^0 — значение резонансной частоты n -го канала при нулевом усилии. Значения крутизны градуировочной характеристики СИШПАВ, полученные в результате исследовательских испытаний, лежат в диапазоне от 9 до 11 кГц/тс. Типичная градуировочная характеристика приведена на рис. 4.

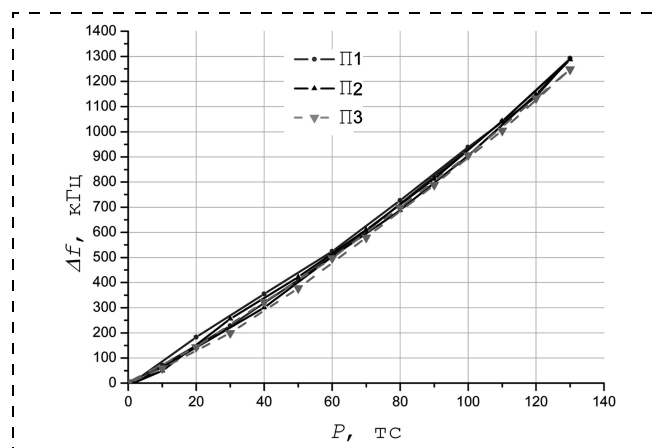


Рис. 4. Градуировочная характеристика СИШПАВ

Таблица 1

Деформационные и температурные коэффициенты чувствительности

Срез кварца	χ_ϵ	χ_{T1}	χ_{T2}	χ_{T3}
Y (Q)	-0,90	2,80	0	0
ST (Q)	-1,44	0	-1,25	0
AT (Q)	-1,10	0	0	0,40
(FQ)	1,85	5	0	0

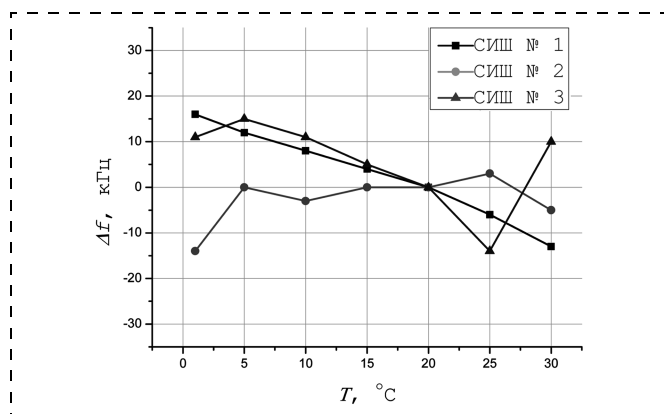


Рис. 5. Графики зависимости нулевого сигнала от температуры

Температурная чувствительность нулевого сигнала для трех различных силоизмерительных шайб приведена на рис. 5. Отметим, что в диапазоне температур 1...30 °С уход частоты не превышает 2 % от верхнего предела измерения.

Система СКДС-СИШ

Система СКДС-СИШ предназначена для осуществления автоматического контроля напряженно-деформированного состояния шпилек крепления крышки турбины к опорному фланцу статора за счет контроля усилий сжатия СИШ. Система состоит из силоизмерительных шайб в количестве 8 штук и датчика температуры в количестве одной штуки (рис. 6, 7). Датчик температуры, входящий в СКДС-СИШ, предназначен для температурной компенсации показаний СИШ и устанавливается в шахту гидроагрегата вблизи одной из силоизмерительной шайб. Степень защиты СИШ, датчика температуры и шкафа пультового — IP67.

Датчики подключаются к удаленно расположенному пультовому шкафу (удаление до 200 м), в котором размещены считыватель частоты ПАВ-резонаторов, контроллер управления и СВЧ коммутатор. Шкаф пультовой обеспечивает считывание

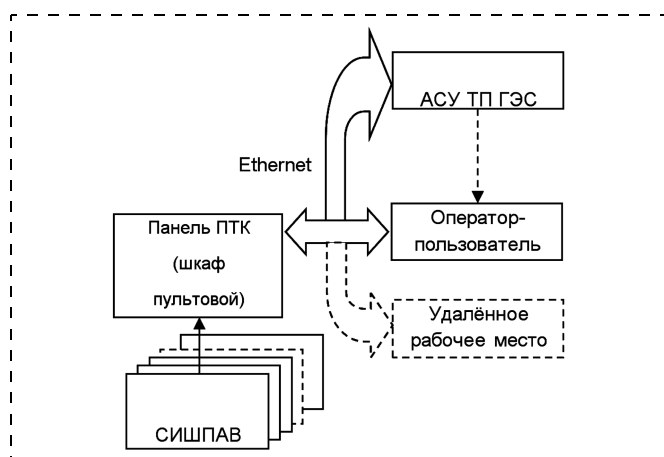


Рис. 6. Структурная схема измерительной системы СКДС-СИШ

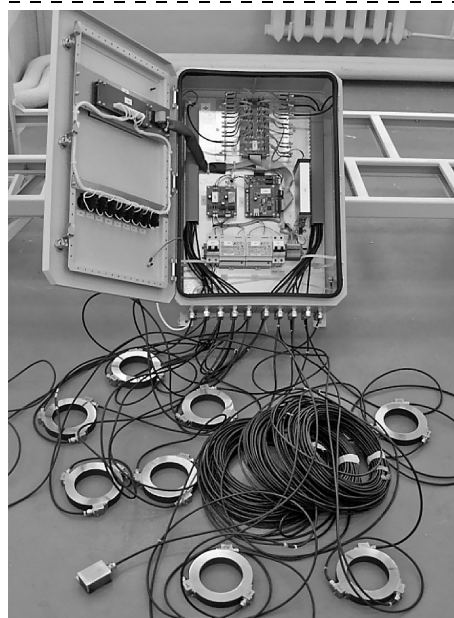


Рис. 7. Система СКДС-СИШ

резонансных частот с каждого ПАВ-резонатора, пересчет значения резонансных частот в значение нагрузки согласно градуировочной характеристике, отображение измерительной информации на дисплее и передачу измерительной информации остальным потребителям по интерфейсу Ethernet.

Основные технические характеристики системы СКДС-СИШ на базе СИШ приведены в табл. 2.

Заключение

Разработан акустоэлектронный датчик силы с чувствительным элементом на ПАВ-резонаторе. Проведено конечно-элементное моделирование и экспериментальное исследование датчиков. Экспериментально определенная чувствительность ПАВ-резонатора лежит в диапазоне 3...3,6 кГц/тс (в расчете получена крутизна 3,3 кГц/тс).

Таблица 2
Основные технические характеристики системы СКДС-СИШ

№ п/п	Параметр	Значение
1.	Число СИШПАВ в составе одной СКДС-СИШ	8
2.	Период опроса каналов СИШ, с	до 8
3.	Контролируемая сила сжатия СИШ, тс	от 35 до 130
4.	Коэффициент запаса прочности СИШ	1,15
5.	Приведенная относительная погрешность СИШ (при НКУ), %	±4
6.	Максимальная длина кабеля, подводимого к СИШ, м	200
7.	Толщина СИШ, не более, мм	не более 25
8.	Рабочая температура СИШ и контролирующего оборудования (шкаф пультовой), °С	от +1 до +30

Разработана система СКДС-СИШ, предназначенная для осуществления автоматического контроля напряженно-деформированного состояния шпилек крепления крышки турбины к опорному фланцу статора за счет контроля усилий сжатия СИШ.

Успешно завершены испытания системы СКДС-СИШ для целей утверждения типа средства измерений. В настоящее время проводится оформление Свидетельства об утверждении типа средства измерений и внесение в Государственный реестр средств измерений.

Проведен монтаж, наладка, запуск, испытания и ввод в эксплуатацию системы СКДС-СИШ на гидроагрегатах № 1 и № 7 Саяно-Шушенской ГЭС имени П. С. Непорожного.

Ведется работа по расширению диапазона измерения и повышению точностных характеристик акустоэлектронного датчика силы.

Список литературы

1. Зеленцов Ю. А., Зеленцов В. Ю. Об эффективности применения пассивных схем термокомпенсации начального разбаланса металлопленочных тензорезисторных датчиков // Микросистемная техника. 2002. № 1. С. 10—11.
2. Галисултанов А. Т., Дзюбаненко С. В., Иванов Н. Н., Калинин В. А. Технология монтажа чувствительных элементов датчиков деформации и их моделирование // Сборник докладов III научно-технической конференции молодых специалистов по радиоэлектронике. СПб.: Изд. ОАО "Авангард". 2010. С. 24—28.
3. Иванов-Есипович Н. К. Физико-химические основы производства радиоэлектронной аппаратуры. М.: Наука, 1979. 195 с.
4. Deng Y. G., Liu J. Corrosion development between liquid gallium and four typical metal substrates used in chip cooling device // Applied Physics A: Materials Science & Processing. 2009. Vol. 95. N 3. P. 907—915.
5. Сорокин З. Г., Волосникова А. В. и др. Марочник сталей и сплавов. М.: Машиностроение, 1989. 640 с.
6. Salt D. Handbook of Quartz Crystal Devices. Berkshire (UK): Van Nostrand Reinholdt, 1987.

УДК 621.3.049; 621.3.082

И. А. Таратын¹, канд. техн. наук, доц.,
нач. управления,

И. В. Сердюк², вед. инженер,
e-mail: serdyuk_ilya@list.ru,

М. С. Смирнов², инженер.,

А. П. Гринчук¹, канд. техн. наук, директор

¹ Минский НИИ радиоматериалов

² ОАО "Авангард", г. Санкт-Петербург

ДАТЧИКИ ПОЖАРНЫХ ИЗВЕЩАТЕЛЕЙ НА ОСНОВЕ НИЗКОЭНЕРГОПОТРЕБЛЯЮЩИХ ГАЗОВЫХ СЕНСОРОВ ДЛЯ РАННЕГО ПРЕДУПРЕЖДЕНИЯ ВОЗГОРАНИЙ

Поступила в редакцию 31.05.2012

Дано описание датчика пожарного извещателя на основе газового сенсора, изготовленного по групповой микроэлектронной технологии. Описан принцип работы полупроводникового сенсора. Приведены результаты испытаний датчиков на газоаналитическом комплексе ОАО "Авангард".

Ключевые слова: газовый сенсорный модуль, оксид алюминия, газовая станция, взрывобезопасный

Основными направлениями развития современных пожарных извещателей (дымовых, тепловых и др.) является комплектация их электронными модулями, содержащими газовый сенсор, который предназначен для определения продуктов раннего тления материалов, таких как СО, Н₂ и сумма углеводородов.

Применение газового сенсорного модуля позволяет повысить точность и уменьшить число ложных срабатываний в пожарных извещателях (ПИ). Основные производители мирового рынка извещателей (дымовой/тепловой/газовый пожарный извещатель): Bosch, Apollo, System Sensor, Novar. В России также начали выпускать комбинированные ПИ, в частности, на рынке появились две модели: СГС-99 и "Эксперт". Однако существующие сегодня объемы рынка требуют создания массового производства газовых сенсоров и датчиков пожарных извещателей (ДПИ) на их основе [1].

Сенсоры для ДПИ должны обладать следующими основными характеристиками:

- чувствительность к малым концентрациям газа (горючие и токсичные газы);
- низкая потребляемая мощность;
- высокое быстродействие;
- длительный ресурс работы;
- низкая цена.

По совокупности признаков наиболее предпочтительным для ПИ представляется применение полупроводниковых сенсоров [2].

Опытные образцы сенсоров СП-1, соответствующих данным требованиям, разработаны специалистами Минского НИИ радиоматериалов (НИИРМ) на базе технологической линии производства микроэлектронных изделий [3].

Основу газового сенсора СП-1 составляет кристалл из нанопористого оксида алюминия, содержащий платиновый нагреватель и полупроводниковый газочувствительный слой. Для обеспечения чувствительности сенсора к различным газам полупроводниковый слой легируется различными добавками из благородных металлов (Pt, Pd, Rh и др.).

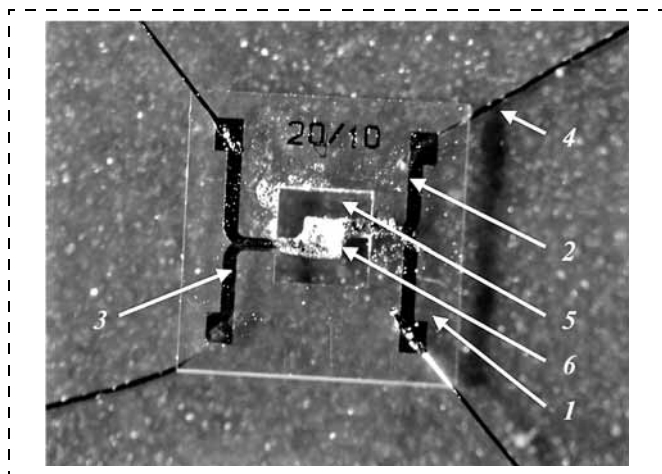


Рис. 1. Фото кристалла полупроводникового сенсора НИИРМ: 1 — подложка из анодированного оксида алюминия (толщиной 40 мкм); 2 — нагреватель Pt; 3 — измерительные электроды Pt; 4 — токоподводы Pt (микропровод 20 мкм.); 5 — сквозные окна в подложке для снижения потребляемой мощности; 6 — полупроводниковый газочувствительный слой на основе SnO_2

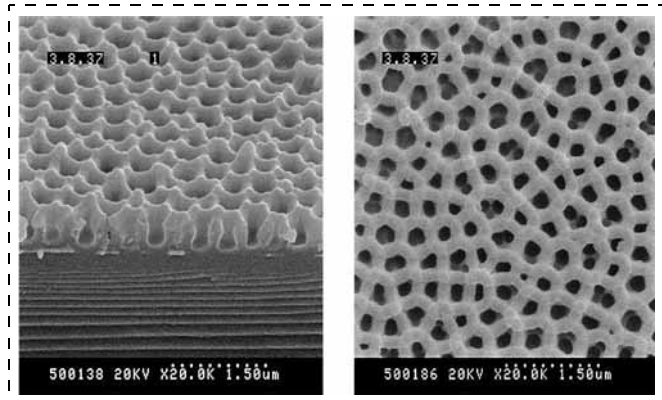


Рис. 2. Микрофотография пористой структуры подложки из АОА

Газовые сенсоры для определения CO и H_2 концентрацией менее 10 ppm с мощностью потребления 50...60 мВт работают при температуре нагрева чувствительного слоя 350...400 °С, причем имеется возможность выделять нужные газы в смеси за счет изменения температуры разогрева сенсора. Селективность сенсора может быть также обеспечена за счет применения специальных фильтров (хемосорбентов или молекулярных сит), устанавливаемых на газопроницаемый элемент сенсора.

Кристалл сенсора СП-1 изображен на рис. 1.

Технические характеристики сенсора СП-1 приведены в таблице.

При изготовлении сенсора на подложку из нанопористого анодированного алюминия методом магнетронного напыления наносится платина (на обе стороны подложки). Таким образом, формируется нагреватель и измерительные электроды. Ввиду того, что пористый анодированный алюминий (размер пор регулируется подбором режимов анодирования) имеет хорошо развитую поверхность,

можно напылять платину без адгезионного подслоя [7].

Структура подложки из анодированного оксида алюминия (АОА) представлена на рис. 2.

Расположение нагревателя и электродов для снятия полезного сигнала на противоположных сторонах кристалла чувствительного элемента, а также наличие перфорации позволяют равномерно прогревать чувствительный слой и снижать потребляемую мощность сенсора.

Как видно из рис. 1, участок кристалла, предназначенный для формирования газочувствительного слоя, выполнен в виде узкой балки, на которой сформированы нагреватель и рабочие электроды. Сквозные "окна" реализуются методом плазмохимического травления оксида алюминия и служат для минимизации тепловых потерь на прогрев кристалла сенсора.

В качестве газочувствительного слоя могут быть использованы различные полупроводниковые оксиды, но наиболее часто применяется оксид олова SnO_2 [5].

Газочувствительный слой SnO_2 наносится на кристалл сенсора по золь-гель-технологии. На первой стадии золь-гель-процесса формируется химический состав продукта (химическая форма вещества и соотношение компонентов), который получают в виде высокодисперсного коллоидного раствора — золя. Размер частиц дисперсной фазы в стабильном золе 10^{-9} ... 10^{-6} м [4]. Увеличение концентрации дисперсной фазы приводит к появлению контактов между частицами и началу структурирования — гелеобразования (вторая стадия золь-гель-процесса). В нашем случае для формирования газочувствительного слоя готовится гидроксид олова, который наносится на кристалл с применением специальных дозаторов. Образование газочувствительной структуры происходит при термическом разложении гидроксида при подаче напряжения на нагреватель сенсора, после чего

Технические характеристики сенсора СП-1

Наименование параметров	Значение параметров
Диапазон контроля концентраций в атмосфере помещений, зданий и сооружений	
H_2	0,3 ppm...100 ppm
CO	2,0 ppm...100 ppm
Погрешность определения концентрации — не более	$\pm 10 \%$
Время реакции датчика на изменение концентрации — не более	10 с
Средняя потребляемая мощность	10 мВт
Предельная температура окружающей среды	От -65 до $+85$ °С
Рабочий диапазон температур	От -10 до $+40$ °С
Относительная влажность окружающей среды	до 98 %

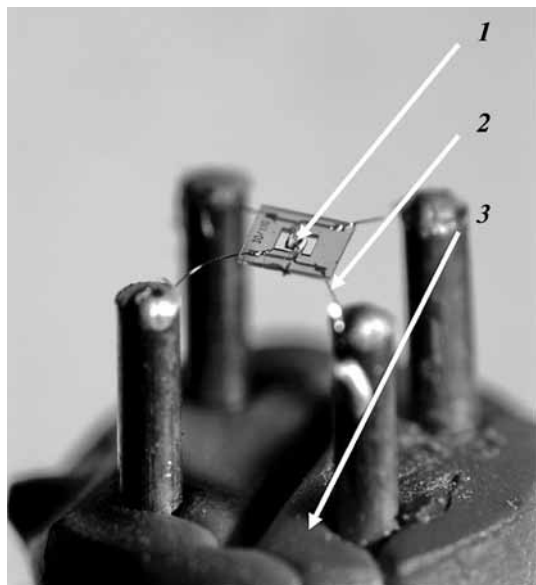
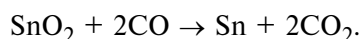


Рис. 3. Кристалл сенсора, смонтированный на основание корпуса:

1 — кристалл; 2 — платиновые токоподводы; 3 — основание

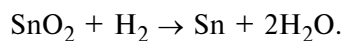
чувствительный элемент проходит термотренировку при температуре 500...550 °С в течение 24 ч.

Определение концентрации газа, например СО, основано на изменении сопротивления чувствительного элемента по сравнению с сопротивлением в чистом воздухе. На поверхности, образованной оксидом олова, при соприкосновении с молекулой СО происходит химическая реакция доокисления углерода и восстановления олова:



Соответственно, при возрастании концентрации СО в воздухе число молекул восстановленного Sn возрастает, что приводит к понижению сопротивления чувствительного элемента. Для получения непрерывного процесса измерения СО необходимо регенерировать поверхность сенсора путем доокисления ранее восстановленного олова. Для реализации этого процесса используется нагревательный элемент, расположенный непосредственно под поверхностью сенсора [5].

По аналогичному механизму происходит взаимодействие диоксида олова с водородом:



Для увеличения чувствительности к различным газам в диоксид олова могут быть введены различные добавки в виде полупроводниковых оксидов или металлов-катализаторов.

На рис. 3 изображен кристалл сенсора, закрепленный на основании корпуса.

Кристалл подвешен на токоподводах из платинового провода диаметра 20 мкм. Переходное сопротивление в зоне контакта платина (токоподвод) — никель (материал стойки) минимально, что

позволяет снизить паразитные шумы при снятии полезного сигнала сенсора.

В качестве газообменного элемента сенсора используется цилиндрическая реакционная камера из прессованного пористого титана (рис. 4). Газообменный элемент предназначен для обеспечения проникновения к сенсору целевого газа, отвода продуктов реакции, а также для защиты сенсора от механических воздействий.

Данная конструкция может быть применена в зонах возможного образования взрывоопасных смесей (например, смесей метан—воздух с концентрацией метана 4,4...15 % об.), т. е. в шахтах, тоннелях, подземных сооружениях и др.

ОАО "Авангард", начиная с 2007 г., проводит с НИИРМ совместную разработку датчика пожарного извещателя на основе полупроводникового сенсора СП-1, чувствительного к малым концентрациям СО и Н₂.

Данная конструкция может применяться для надземных бытовых и промышленных объектов, причем сенсор выполняется в транзисторном корпусе ТО-5 [6]. Данный корпус является стандартным изделием, выпускаемым в больших объемах, что существенно снижает его стоимость по сравнению с корпусом из прессованного пористого титана.

Общий вид датчика газового пожарного извещателя представлен на рис. 5.

На рис. 6 представлены основные конструктивные элементы датчика пожарного извещателя (ДПИ).

Для построения электронной схемы ДПИ применена современная элементная база, обеспечивающая стабильное напряжение питания сенсора и высокий коэффициент усиления сигнала на малых концентрациях газа.

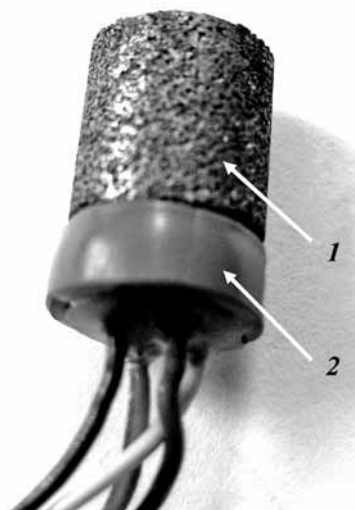


Рис. 4. Общий вид полупроводникового газового сенсора во взрывобезопасном исполнении:

1 — газообменный элемент из прессованного пористого титана; 2 — основание корпуса сенсора

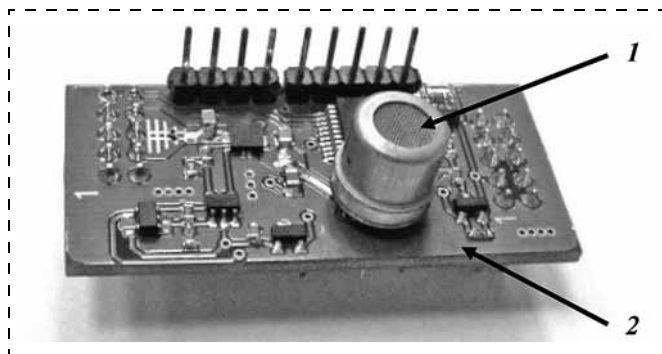


Рис. 5. Датчик газового пожарного извещателя:

1 — полупроводниковый сенсор СП-1 в корпусе ТО-5; 2 — модуль управления и первичной обработки сигнала сенсора

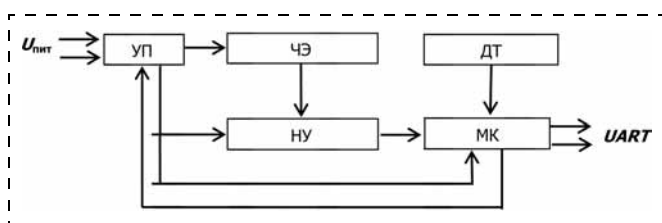


Рис. 6. Схема датчика газового пожарного извещателя:

УП — узел питания; ЧЭ — чувствительный элемент (полупроводниковый сенсор); ДТ — датчик температуры; НУ — нормирующий усилитель; МК — микроконтроллер; $U_{\text{пит}}$ — питающее напряжение; $UART$ — цифровой выходной сигнал (протокол $UART$)

Схема обеспечивает возможность установки ДПИ в любой ПИ, имеющий внутренний интерфейс I^2C . По шине данных можно запрограммировать тип сенсора, для которого будут выбраны режимы питания и принцип съема данных. Схема ДПИ позволяет проводить калибровку двух порогов по заданным значениям целевого газа.

В схеме ДПИ имеется узел питания для различных типов сенсоров, узел усиления и обработки сигнала, узел оцифровки сигнала и передачи его по выходной шине с интерфейсом I^2C .

Плата ДПИ имеет малые габаритные размеры, что облегчает монтаж в различные по конструкции пожарные извещатели. Технологический процесс сборки электронных схем ДПИ на печатных платах может быть реализован с применением стандартного оборудования для поверхностного и объемного монтажа.

Для испытаний газовых датчиков с полупроводниковыми сенсорами весьма важно обеспечить стабильность характеристик воздействующих факторов таких как:

- расход газовой смеси, подаваемой на сенсор;
- влажность смеси;
- температура;
- состав смеси (отсутствие примесей) и др.

Кроме того, необходимо применять современные методы обработки данных по результатам испытаний с выводом информации в табличном или

графическом виде на персональном компьютере, созданием объемных баз данных и т. п.

Всем перечисленным требованиям удовлетворяет газосмесительная станция (ГС) производства ОАО "Авангард", предназначенная для приготовления увлажненных газовых смесей [8]. ГС может применяться для проверки работоспособности, наладки, градуировки и поверки газоаналитических приборов и сенсоров.

Использование ГС для наладки, калибровки и проверки газоаналитических приборов и сенсоров позволило сократить расходы на приобретение баллонов с проверочными газовыми смесями в 5 раз [8].

В результате испытаний на газосмесительной станции были установлены основные характеристики сенсоров — зависимости полезного сигнала от концентраций H_2 и CO (рис. 7, 8).

Как видно из рис. 7 и 8, сенсор НИИРМ позволяет обнаружить присутствие H_2 и CO в воздухе в диапазоне концентраций 0,3 ppm...100 ppm H_2 и 2,0 ppm...100 ppm CO .

По результатам исследовательских испытаний сенсоры производства НИИРМ представляются перспективными для применения в ДПИ и в настоящее время проходят испытания на долговременную стабильность при постоянной подаче напряжения.

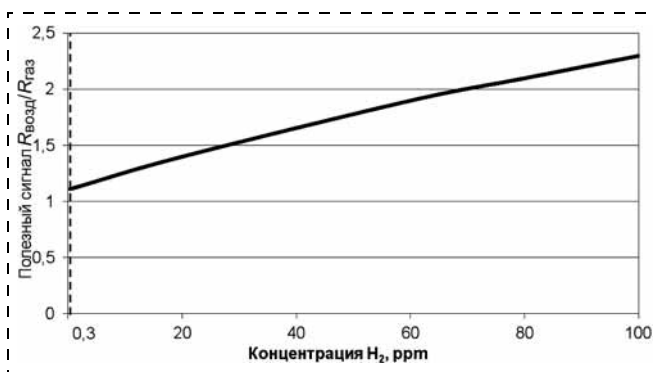


Рис. 7. Зависимость полезного сигнала сенсора от концентрации H_2

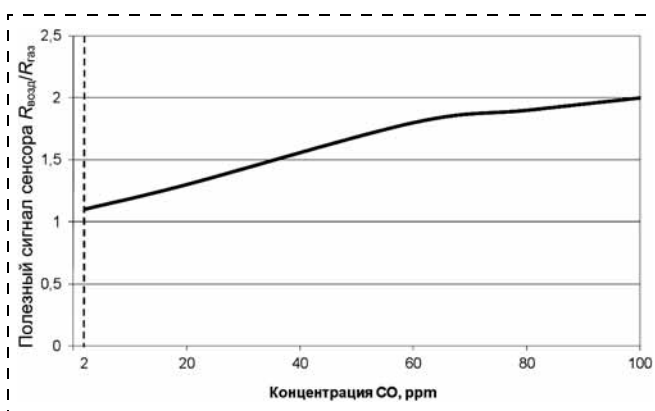


Рис. 8. Зависимость полезного сигнала сенсора от концентрации CO

Заключение по долговременной стабильности можно будет сделать по истечению 5—6 месяцев постоянной работы сенсоров. При получении положительного результата будут проведены испытания на воздействие изменений температуры, влажности и испытания на механическую прочность.

В заключение можно отметить, что при условии положительных результатов испытаний использование ДПИ в составе систем пожарной сигнализации позволит в расчете на период эксплуатации снизить затраты организаций-потребителей по сравнению с использованием систем с односенсорными ПИ, например, благодаря меньшим потерям от нарушений работы объектов из-за ложных срабатываний ПИ [1].

Список литературы

1. Голиков А. В., Шубарев В. А. Системы пожарной безопасности с газовыми сенсорными модулями // Электроника: Наука. Технология. Бизнес. 2008. № 10. С. 78—80.

2. Васильев А., Олихов И., Соколов А. Газовые сенсоры для пожарных извещателей // ЭЛЕКТРОНИКА: НТБ. 2005. № 2. С. 24—27.

3. Таратын И. А., Постарнаков С. В., Сердюк И. В. Унифицированные датчики пожарных извещателей систем безопасности, раннего предупреждения возгораний // Вопросы радиоэлектроники. 2012. № 1. С. 123—130.

4. Максимов А. И., Мошников В. А., Таиров Ю. М., Шилова О. А. Основы золь-гель технологии нанокompозитов. СПб: Элмор, 2008.

5. Бубнов Ю. З., Голиков А. В., Казак А. В. Полупроводниковые газовые сенсоры и газоаналитические приборы на их основе // Электроника: Наука. Технология. Бизнес. 2008. № 10. С. 72—77.

6. "Завод "Марс". Производство и продажа металло-стеклянных корпусов. Официальный сайт ОАО "Завод "Марс" — URL: <http://www.z-mars.ru/>, свободный. — Загл. с экрана.

7. Васильев А., Олихов И., Сомтаев Н. Технология "нано-на-микро". Улучшение характеристик газовых сенсоров // Электроника: Наука. Технология. Бизнес. 2011. № 1. С. 36—44.

8. ОАО "АВАНГАРД" — главная страница. URL: <http://www.avangard.org/>

УДК 621.039.8

С. П. Тимошенков¹, д-р техн. наук, проф.,
зав. кафедрой,
В. В. Калугин¹, д-р техн. наук, вед. инженер,
Е. С. Кочурина¹, инженер,
С. А. Анчутин¹, вед. инженер,
В. А. Калинин², канд. техн. наук, нач. отд.,
К. А. Строганов², аспирант, нач. сект.

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

e-mail: spt@miee.ru, viktor118@mail.ru

² ОАО "Авангард", г. Санкт-Петербург,
e-mail: avangard@avangard.org

МИКРОАКСЕЛЕРОМЕТРЫ НА РАЗЛИЧНЫЕ ДИАПАЗОНЫ ИЗМЕРЕНИЯ ЛИНЕЙНЫХ УСКОРЕНИЙ ДЛЯ СИСТЕМ ИНЕРЦИАЛЬНОЙ НАВИГАЦИИ

Поступила в редакцию 05.06.2012

Рассмотрены микромеханические акселерометры, имеющие потенциально широкую область применения. Разработаны микроакселерометры с емкостной системой измерения перемещений чувствительного элемента, достоинством которой является высокая чувствительность, простота конструкции и технологии изготовления.

Ключевые слова: микроакселерометры, МЭМС, емкостной акселерометр

В последние годы получает широкое развитие направление технологии приборостроения — создание микроэлектромеханических систем (МЭМС). Главным в этом направлении является применение микроэлектронной технологии, адаптированной для производства сложных интегрированных устройств и систем на их основе. Потребителями МЭМС являются многие отрасли промышленности: автомобилестроение; робототехника; спорт; медицина; бытовая техника; военная промышленность и др. Важное место в ряду МЭМС заняли датчики первичной информации, к числу которых относят микромеханические акселерометры (ММА). Микроакселерометры предназначены для получения информации о линейных ускорениях и могут послужить для построения инерциальных навигационных систем самого широкого диапазона применений. Комбинация изделий МЭМС позволит разработать и организовать производство сложных интеллектуальных автономных систем. Преимуществами ММА, изготовленных по технологии микросистемной техники, являются: низкая цена конечного изделия; надежность и повторяемость характеристик; миниатюрность приборов, а следовательно, низкое энергопотребление, ударо- и вибропрочность, что значительно расширяет область применения таких изделий. МЭМС в общем и микромеханические акселерометры, в частности, имеют большой потенциал как в гражданском, так и в военном секторе промышленности [1, 2].

Разработанный микромеханический акселерометр состоит из двух основных узлов: чувствитель-

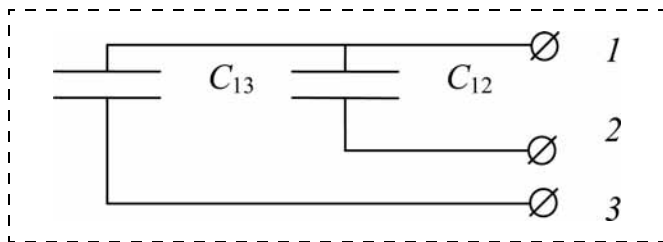


Рис. 1. Эквивалентная электрическая схема ЧЭ микроакселерометра

ного элемента (ЧЭ), воспринимающего воздействующее ускорение, и электронной схемы, преобразующей перемещение ЧЭ в выходной цифровой сигнал.

Существуют несколько типов микромеханических акселерометров, различающихся по способу регистрации перемещений ЧЭ при воздействии ускорения. В МИЭТ совместно с ОАО "Авангард" разрабатывается ММА с емкостной системой измерения перемещений ЧЭ. Достоинством этой системы является высокая чувствительность, простота конструкции и технологии изготовления. Чувствительный элемент рассматриваемого в данной статье ММА прямого преобразования представляет собой конструкцию маятникового типа. Инерционная масса, подвешенная к основанию с помощью упругих элементов (торсионов), воспринимает действующее ускорение и является одной из обкладок емкостной системы съема сигнала. В качестве неподвижной обкладки служит стеклянная пластина с напыленными электродами. Достоинствами изготовления такой конструкции являются два рабочих плеча ЧЭ, которые позволяют увеличить чувствительность к действующему ускорению.

В микроакселерометре (МА) в качестве ЧЭ используется маятниковая конструкция, изготовленная из кремния. Эквивалентная электрическая схема ЧЭ показана на рис. 1.

Под действием линейного ускорения (сил инерции) маятник отклоняется от положения равновесия, что приводит к изменению емкостей ЧЭ согласно следующим соотношениям:

$$\begin{aligned} C_{12} &= \frac{a_0}{x_0 + a_1 a}; \\ C_{13} &= \frac{a_0}{x_0 - a_1 a}, \end{aligned} \quad (1)$$

где a_0, a_1, x_0 — параметры ЧЭ, определяемые конструкцией; a — проекция линейного ускорения ЧЭ на его измерительную ось.

На рис. 2 приведена схема включения ЧЭ маятникового типа.

Для схемы, приведенной на рис. 2, можно записать следующие соотношения:

$$\begin{aligned} U_g &= U_{g0} \sin(\omega_g t); \\ U_1 &= V_3 + \frac{R_2(C_{12} - C_{13})\omega_g U_{g0}}{2\sqrt{1 + R_1(C_{12} - C_{13})\omega_g}} \times \\ &\times \cos\left(\omega_g t + \arctg \frac{1}{R_1(C_{12} - C_{13})\omega_g}\right) \approx \\ &\approx V_3 - \frac{R_2(C_{12} - C_{13})\omega_g U_{g0}}{2\sqrt{1 + R_1(C_{12} - C_{13})\omega_g}} \sin(\omega_g t), \end{aligned} \quad (2)$$

где U_g — сигнал, формируемый генератором; U_{g0} — амплитуда сигнала; ω_g — частота сигнала; U_1 — измеренный в итоге сигнал ММА; V_3 — нулевой сигнал ММА.

Подставляя в выражение (2) соотношения (1), получим

$$U_1 = V_3 - \frac{R_2 a_0 a_1 \omega_g U_{g0}}{\sqrt{a_1^2 a^2 - x_0^2 + 2a_0 a_1 a R_1 \omega_g}} \sin(\omega_g t). \quad (3)$$

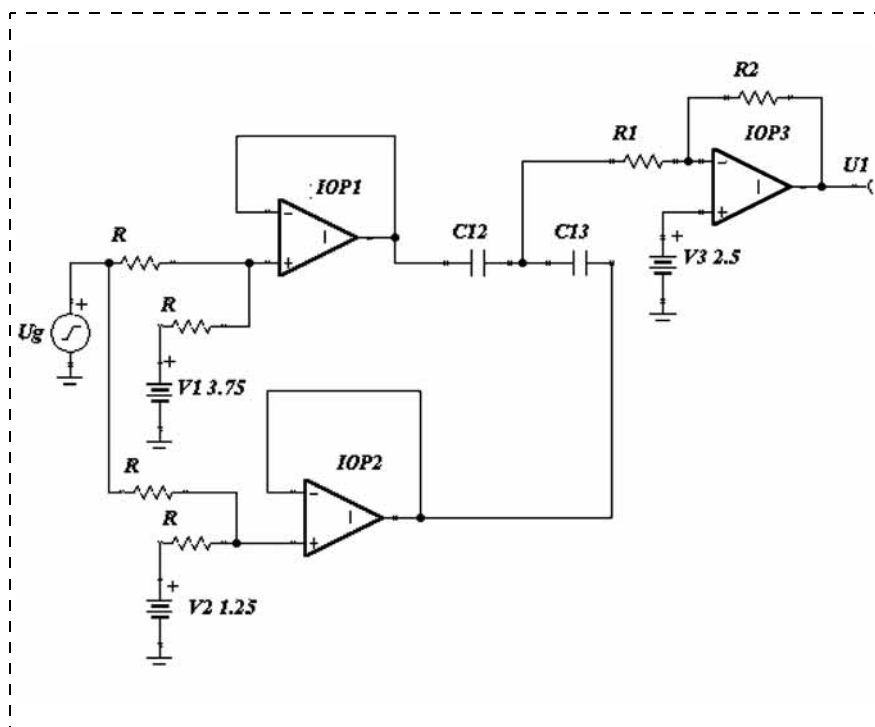


Рис. 2. Измерительная схема микроакселерометра МА (генератор накачки и предварительный усилитель)

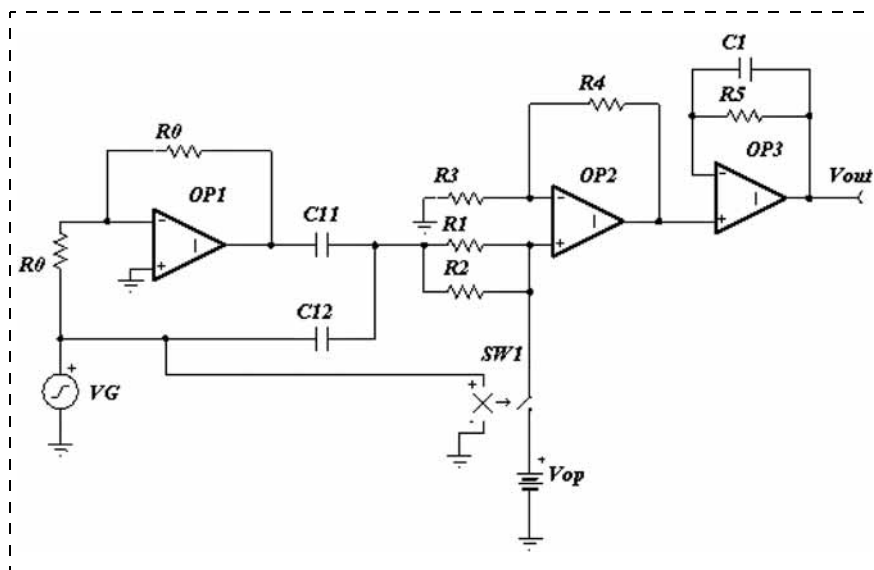


Рис. 3. Функциональная схема системы измерения сигнала микроакселерометра по методу баланса зарядов

Пропуская сигнал U_1 через синхронный детектор, выделим амплитуду результирующих колебаний:

$$U_{1c.d} = V_3 - \frac{R_2 a_0 a_1 \omega_g U_{g0}}{2 \sqrt{a_1^2 a^2 - x_0^2 + 2 a_0 a_1 a R_1 \omega_g}} a. \quad (4)$$

Запишем разложение в ряд для сигнала $U_{1c.d}$:

$$\begin{aligned} U_{1c.d} &\approx \\ &\approx V_3 - \frac{a_0 a_1 R_2 U_{g0} \omega_g}{x_0^2} a - \\ &- \frac{a_0^2 a_1^2 R_1 R_2 U_{g0} \omega_g^2}{x_0^4} a^2. \end{aligned} \quad (5)$$

Таким образом, выходной сигнал микроакселерометра (для идеального ЧЭ) примет вид:

$$U_{1c.d} \approx V_3 - K_1 a - N a^2. \quad (6)$$

Здесь V_3 — нулевой сигнал микроакселерометра; $K_1 = \frac{a_0 a_1 R_2 U_{g0} \omega_g}{x_0^2}$ —

масштабный коэффициент микроакселерометра; $N = \frac{a_0^2 a_1^2 R_1 R_2 U_{g0} \omega_g^2}{x_0^4}$ —

коэффициент нелинейности характеристики преобразования микроакселерометра.

Функциональная схема системы измерения сигнала микроакселерометра по методу баланса зарядов приведена на рис. 3.

Конструктивно микроакселерометр может содержать до трех ЧЭ, установленных по трем ортогональным осям, и соответственно, до трех схем измерения емкостного сигнала ЧЭ.

Выходные сигналы систем измерения сигнала ЧЭ микроакселерометра преобразуются в цифровой вид с помощью 24-разрядного дельта-сигма АЦП. Использование дельта-сигма АЦП позволяет упростить требования к схеме согласования (за счет применения менее сложных сглаживающих фильтров). Кроме того, наличие встроенного настраиваемого циф-

рового фильтра позволяет снять часть вычислительной нагрузки с микроконтроллера. Частота выдачи данных АЦП — до 1 кГц, что позволяет обеспечить полосу пропускания микроакселерометра (по трем каналам) до 150 Гц. Цифровой код обрабатывается вычислителем (компенсация нелинейности, нулевого сигнала, коррекция масштабного коэффици-

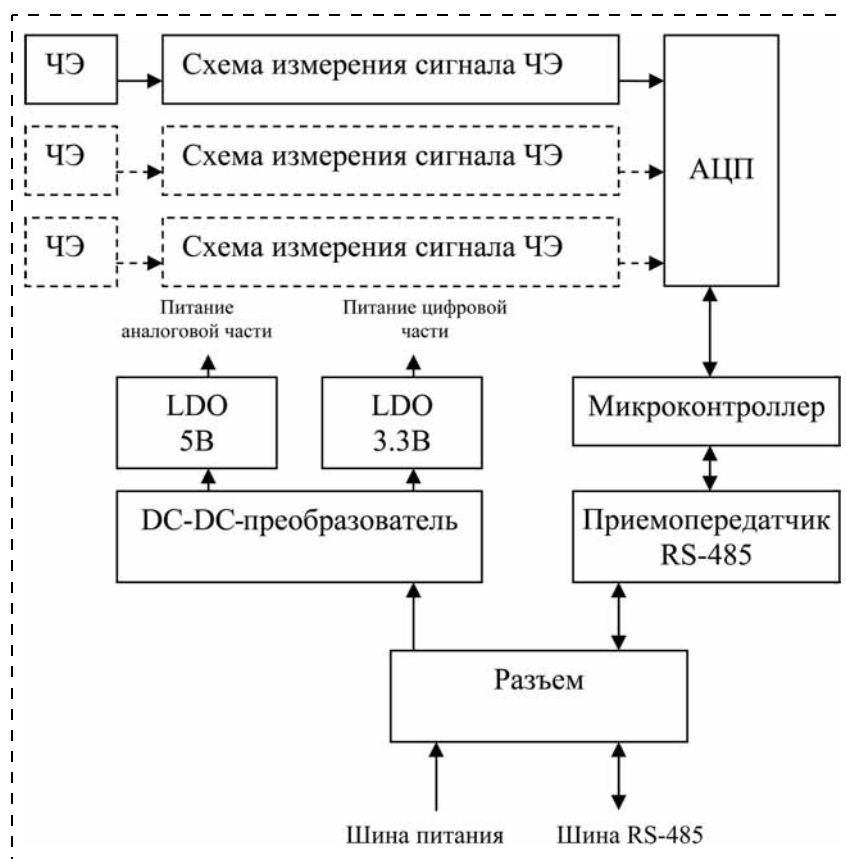


Рис. 4. Функциональная схема микроакселерометра

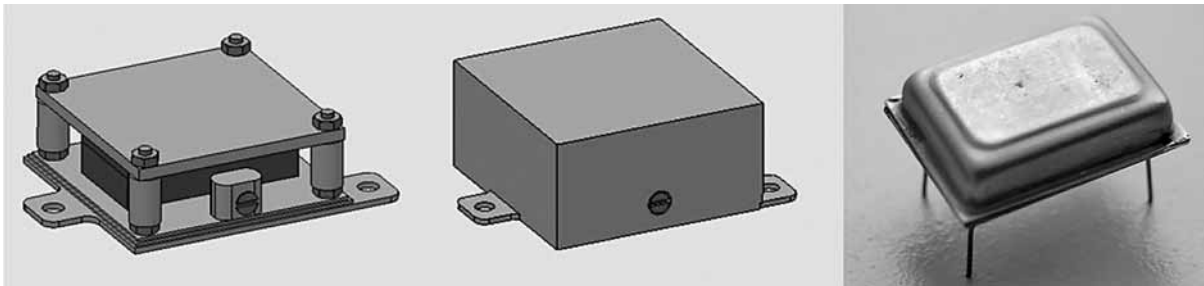


Рис. 5. Внешний вид микроакселерометра

ента и т. п.) и выдается (по запросу) потребителю по шине RS-485. Подсистема питания реализована на базе преобразователя постоянного напряжения (DC-DC преобразователя) TPS61030. Использование этого преобразователя позволяет сформировать вторичные напряжения питания (+5 В, +3,3 В). Входное напряжение питания — от 1,8 до 5,5 В, что делает микроакселерометр подходящим для использования в системах с батарейным питанием.

Функциональная схема микроакселерометра приведена на рис. 4.

Варианты внешнего вида разрабатываемого микроакселерометра представлены на рис. 5.

Микроакселерометр предназначен для измерения кажущегося ускорения (проекции на одну или три измерительных оси в зависимости от варианта) и выдачи результатов измерения потребителю в цифровом виде. Предполагаемый диапазон измерения $\pm 1g$, $\pm 5g$, $\pm 10g$, $\pm 50g$, $\pm 200g$.

Расчеты, проведенные в системе конечно-элементного анализа ANSYS [4, 5], показывают, что разрабатываемая конструкция микромеханического акселерометра является работоспособной. Погрешности, возникающие за счет движения по паразитным степеням свободы, минимальны для торсиона с крестообразным сечением. Это связано с тем, что собственные частоты по паразитным степеням свободы значительно превышают собственную частоту по "рабочей" степени свободы (т. е. паразитные степени свободы более "жесткие"). При моделировании влияния внешних воздействий (удар одиночного действия, синусоидальная вибрация) было выявлено, что максимальное перемещение ЧЭ составляет 24 мкм, это меньше зазора между статором и ЧЭ, равным 30 мкм [6—9]. Напряжение материала конструкции не превышает максимально допустимого (10^9 Па). Следовательно, конструкция является устойчивой к воздействию внешних возмущающих факторов — синусоидальной вибра-

ции (диапазон частот 12...1000 Гц, амплитуда 3g) и механического удара одиночного действия (амплитудой 10g и длительностью 2 мс).

Рассчитан коэффициент технологической применимости, который равен 97,1 %, что говорит о большом числе унифицированных операций. Конструкция чувствительного элемента, разработанного для ММА, позволяет применять типовые технологические процессы микроэлектроники с некоторыми дополнениями и использовать для изготовления типовую производственно-технологическую линейку.

Список литературы

1. **Нано- и микросистемная техника.** От исследований к разработкам / Под ред. П. П. Мальцева. М.: Техносфера, 2005. 592 с.
2. **Каплун А. Б., Морозов Е. М., Олферова М. А.** ANSYS в руках инженера: практическое руководство. М.: Едиториал УРСС, 2003. 272 с.
3. **Шахнович И.** Сигма-дельта АЦП // Электроника: Наука, технология. Бизнес. 2006. № 4. С. 18—22.
4. **Анчутин С. А., Плеханов В. Е., Тимошенко С. П.** Введение в конечно-элементный анализ. Использование ANSYS в задачах математической физики: учеб. пособие. М.: МИЭТ, 2007. 280 с.
5. **Кобзарь А. И.** Прикладная математическая статистика. М.: Физматлит, 2006. 816 с.
6. **Мельников А. А.** Расчет электромагнитных и температурных полей методом конечных элементов: учеб. пособие. М.: Изд. ГОУ ВПО "Московский государственный институт радиотехники, электроники и автоматики (технический университет)", 2001. 76 с.
7. **Зотов С. А.** Расчет формы деформируемой балки микромеханического акселерометра // Известия Тул. госуд. университета. Серия. Проблемы специального машиностроения. Вып. 4 (4.2). Тула 2001. С. 154—157.
8. **Зотов С. А.** Формы колебаний микромеханического акселерометра // Известия Тул. госуд. университета. Серия. Проблемы специального машиностроения. Вып. 4 (4.2). Тула 2001. С. 178—181.
9. **Нечепав В. Г., Пустовой А. А.** Методика прочностного анализа корпусных деталей проходческих комбайнов // Машинознавство. Матеріали 9-ої регіональної науково-методичної конференції. Донецьк: ДонНТУ, 2007. С. 52—56.

УДК 681.586.326

В. В. Пинаев¹, канд. техн. наук, нач. сектора,
В. С. Суханов², нач. лаб.,
В. В. Панков², ст. науч. сотр.,
Ю. А. Михайлов², канд. техн. наук,
 руководитель группы,
Н. Л. Данилова², ст. науч. сотр.,
С. Ф. Былинкин³, канд. техн. наук, нач. отдела,
А. А. Гаврилов³, инженер,
А. Н. Шипунов³, вед. инженер

¹ Открытое акционерное общество "Авангард",
 e-mail: avangard@avangard.org

² Федеральное государственное бюджетное
 учреждение "Научно-производственный комплекс
 "Технологический центр" МИЭТ",
 e-mail: vs@icnt.ru

³ Открытое акционерное общество
 "Арзамасское научно-производственное
 предприятие "ТЕМП-АВИА",
 e-mail: oao@temp-avia.ru

ИНТЕГРАЛЬНЫЕ МЭМС-ДАТЧИКИ С ПОВЫШЕННОЙ СТАБИЛЬНОСТЬЮ ВЫХОДНЫХ ПАРАМЕТРОВ

Поступила в редакцию 11.05.2012

На примере изготовления чувствительных элементов датчиков давления и акселерометров рассмотрены технологические методики, обеспечивающие повышение временной стабильности их параметров. Приведены результаты ускоренных испытаний на безотказность макетных образцов. Расчетно-экспериментальным путем определены показатели надежности датчиков.

Ключевые слова: датчик давления, акселерометр, чувствительный элемент, временная стабильность параметров, испытания на безотказность

Введение

В процессе выполнения программы "Микро-системотехника" Союзного государства, головным исполнителем которой является ОАО "Авангард", была проведена разработка, направленная на создание отечественной электронной компонентной базы для малогабаритных стабильных датчиков давления и акселерометров. Предполагаемое ис-

пользование данных датчиков — в системах контроля и управления вооружения и военной техники, а также в различных областях народного хозяйства: авиационной, автомобильной технике, нефтегазовой промышленности, транспорте. В качестве конструктивно-технологического базиса для создания высокостабильных датчиков давления и акселерометров были использованы методы формирования объемных структур в монокристаллическом кремнии.

Интегральные МЭМС-акселерометры

Основной технологической задачей изготовления чувствительного элемента акселерометров (ЧЭА) является достижение необходимой точности выполнения и контроля геометрических размеров при операции травления. Для повышения точности изготовления глубокопрофилированных кремниевых структур процесс фотолитографии выполнялся с использованием контрастного слоя из материала, отличающегося от материала защитного слоя (рис. 1).

Этот способ позволяет четко контролировать рельефную структуру на пластине через фотошаб-

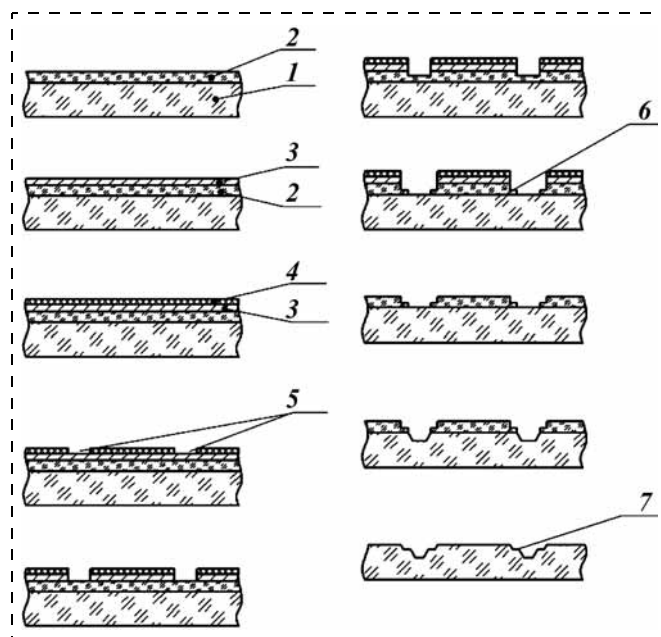


Рис. 1. Последовательность операций для фотолитографии с контрастным слоем:

1 — кремниевая пластина; 2 — защитный слой; 3 — контрастный слой; 4 — фоторезист; 5 — окна; 6 — структура в защитном слое; 7 — заданный профиль.

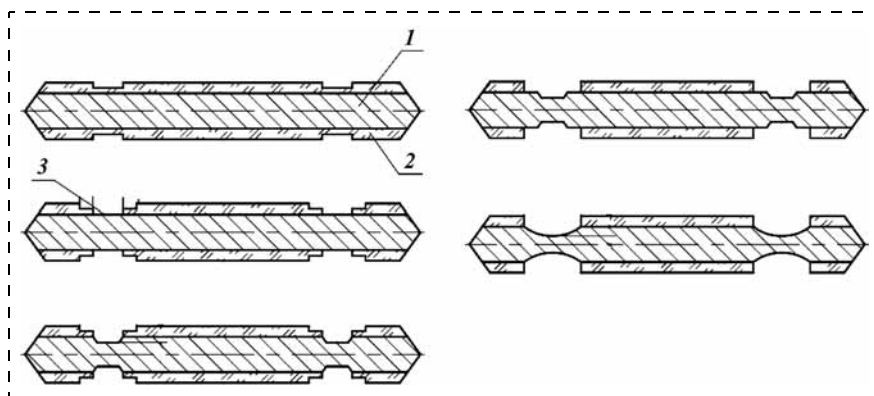


Рис. 2. Последовательность операций при ступенчатом травлении:

1 — кремниевая пластина; 2 — защитный слой (оксид кремния); 3 — структура в оксиде кремния

лон, что обеспечивает более точное совмещение экспонируемого изображения с уже существующим на пластине рисунком. На кремниевой пластине создается защитный слой из оксида кремния, на который наносится контрастный слой из алюминия. Проводится операция фотолитографии, в местах сформировавшихся окон стравливается контрастный слой до появления защитного, затем выполняется травление защитного слоя до нужной глубины. После этого удаляется фоторезист со всей кремниевой пластины. Чередованием операций фотолитографии и травления формируется необходимый профиль.

В целях снижения трудоемкости изготовления кристаллических элементов и повышения точности их размерной обработки разработан способ изготовления ЧЭА, показанный на рис. 2. Особенностью данного способа является проведение нескольких циклов фотолитографии по оксиду кремния для формирования окон со ступенчатым профилем с последующим анизотропным травлением в этих окнах без дополнительной операции окисления. Подвес, сформированный данным способом, не имеет острых кромок и резких переходов, что существенно снижает концентрацию механических напряжений в местах сопряжения упругих элементов, и при воздействии измеряемой величины на чувствительный элемент упругий подвес локально деформируется в средней точке.

Наиболее важной частью ЧЭА является упругий подвес, геометрическая форма и размеры которого непосредственно влияет на точность и диапазон измерения. С уче-

том сложности контроля параметров упругого подвеса при травлении разработаны способы изготовления и технологическая методика контроля толщины упругого подвеса.

Данный способ изготовления упругого подвеса (рис. 3) микромеханического устройства позволяет повысить точность изготовления подвеса. На окисленную кремниевую пластину с ориентацией в плоскости [100] наносится защитный слой фоторезиста, проводится двустороннее экспонирование для вскрытия окон в оксиде кремния.

При этом в месте формирования подвеса предусмотрено создание топологии "самотормозящейся" канавки. Далее проводится анизотропное травление, при котором сначала происходит формирование самотормозящейся канавки за счет кристаллографических направлений, затем выполняются повторное скрытие окон по тому же слою оксида и анизотропное травление для формирования окончательной геометрии упругого подвеса. Рассмотренная методика позволяет в широких пределах регулировать жесткость подвеса за счет изменения ширины канавки для предварительного травления или времени травления в гидроксиде калия. Данная методика обеспечивает высокое качество поверхности упругого элемента и снижает трудоемкость.

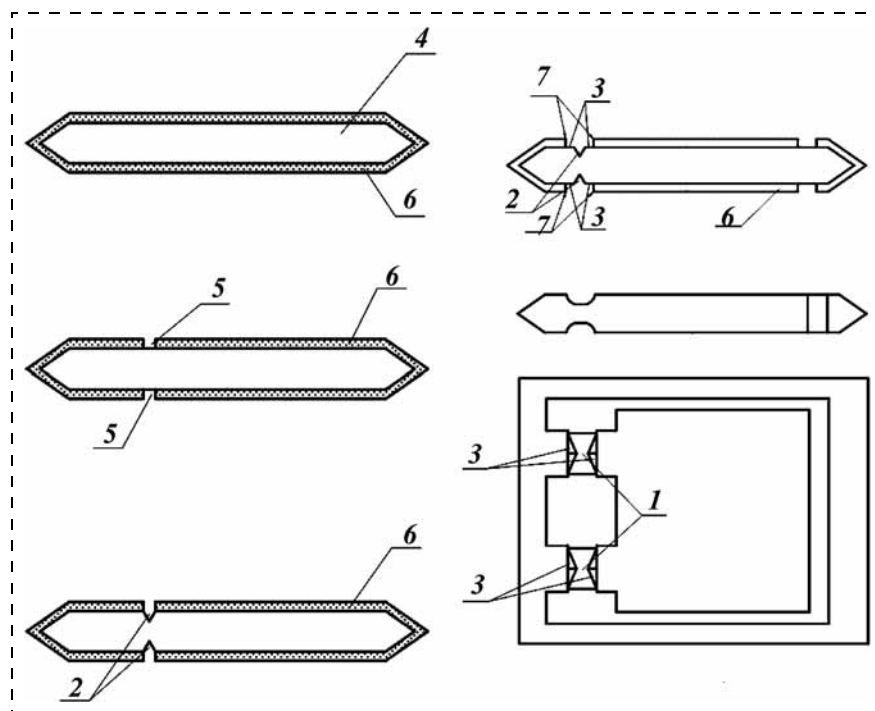


Рис. 3. Последовательность операций при изготовлении упругого подвеса:

1 — упругий элемент; 2 — канавка; 3 — выступающие углы; 4 — кремниевая пластина; 5 — окна; 6 — защитный слой оксида; 7 — повторно вскрытое окно

При формировании ступенчатого профиля в оксиде кремния с последующим анизотропным травлением самой кремниевой пластины необходимо учитывать, что при анизотропном травлении кремния происходит и травление оксида, причем толщина оксидной пленки неоднородна по всей поверхности пластины и имеет субмикрометровые дефекты. В связи с этим разработана методика обеспечения необходимой исходной толщины оксидной пленки и параметров пооперационного травления оксида кремния при изготовлении кристаллического элемента. В данной технологической методике учитываются скорость травления кремния и оксида кремния в щелочном травителе, необходимая глубина травления кремния и технологический запас на субмикрометровые дефекты, и приведена последовательность расчетов определения достаточной толщины оксидной пленки.

Исходными данными для расчета ступеньки $H_{\text{ст}}$ являются: скорость травления кремния ($V_{\text{к}}$) и оксида кремния ($V_{\text{о}}$) в щелочном травителе; необходимая глубина травления кремния ($H_{\text{к}}$); технологический запас на субмикрометровые дефекты (h_0):

$$H_{\text{ст}} = \frac{V_{\text{о}}}{V_{\text{к}}} H_{\text{к}} + h_0.$$

Наряду с технологическими методиками изготовления разработана методика определения параметров упругого подвеса. Для определения толщины и жесткости упругого подвеса можно использовать собственную частоту изгибных колебаний маятника ЧЭА:

$$f = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{Ebh^3}{4mla^2}},$$

где $E = 1,46 \cdot 10^{11}$ Н/м² — модуль упругости кремния [100]; b — ширина подвеса; h — толщина подвеса; m — масса маятника; l — длина подвеса; a — размер стороны квадрата маятника.

По методике ЧЭА закрепляется на диффузоре широкополосного громкоговорителя, на который от звукового генератора подается напряжение изменяющейся частоты в диапазоне от 200 до 3000 Гц. Собственная частота колебаний маятника определяется визуально по максимальному отклонению маятника. В зависимости от частоты ЧЭА разделяются по жесткости подвеса и, следовательно, по диапазону.

С использованием перечисленных выше методик на базе предприятия ОАО АНПП "Темп-Авиа" были изготовлены и испытаны макетные образцы ЧЭА. Испытания показали, что в результате внедрения методик выросла точность размерного анизотропного травления кремния, выход годных кри-

сталлических элементов увеличился в 2,4 раза, стабильность крутизны акселерометров повысилась на 56 %, ударопрочность возросла в 1,8 раза, увеличилась надежность изделий в целом.

Интегральные МЭМС-датчики давления

При создании высокостабильных датчиков давления используются конструкции с тензoeffектом на кремнии. Основные преимущества интегральных механоэлектрических преобразователей заключаются в следующем:

- тензочувствительный элемент является неотъемлемой частью упругого элемента, что исключает промежуточный, например соединительный, слой и тем самым устраняет явления ползучести и гистерезиса преобразовательной характеристики и способствует повышению стабильности преобразователя;
- упругий элемент преобразователя выполнен из монокристаллического материала, обладающего совершенными упругими свойствами, в котором такие явления, как усталость и деструкция, должны проявляться в меньшей степени, что также ведет к повышению стабильности преобразователя;
- технология интегральных микросхем и использование монокристаллического материала для упругих элементов преобразователя определяют их значительно более высокую надежность по сравнению с традиционными преобразователями.

В конструкцию датчика давления входит чувствительный элемент давления (ЧЭД), созданный на базе интегрального преобразователя мембранного типа. Чувствительный элемент давления представляет собой сборку, состоящую из тензочувствительного кристалла интегрального преобразователя давления (ИПД), переходных деталей в виде кремниевых прокладок и основания, соединенных низкотемпературным стеклом в вакууме [1]. Выходные характеристики ЧЭД повторяют выходные характеристики кристалла ИПД, входящего в состав ЧЭД. Конструкция ЧЭД обеспечивает развязку от корпуса независимо от способа закрепления нижнего торца основания в широком интервале температур от -50 до $+100$ °С. Для повышения чувствительности к давлению и снижения погрешностей преобразовательной характеристики в диапазоне температур в ЧЭД используются интегральные преобразователи давления с тремя жесткими центрами [2]. Технология изготовления интегральных преобразователей, разработанная в НПК "Технологический центр", базируется на КМОП-технологии изготовления интегральных схем (ИС) в сочетании с рядом специфических операций формирования сложнопрофилированной мембраны.

Особенностью разработанного конструктивно-технологического базиса является максимальное использование производственного технологического оборудования, предназначенного для производства КМОП-схем, при формировании тензорезисторов и биполярной схемы термокомпенсации с оптимальными характеристиками для интегральных преобразователей физических величин в широком температурном диапазоне [3].

В технологический маршрут изготовления ИПД были введены технологические методики обеспечения стабильности выходных параметров интегральных датчиков:

- методика управления процессами ионного легирования бором и фосфором при получении кристаллов ИПД [4];
- методика формирования тонкого слоя диэлектрика над мембраной с лицевой стороны кристалла ИПД;
- методика получения мембран толщиной менее 35 мкм;
- методика изотропного финишного дотрава мембраны ИПД.

В технологический маршрут изготовления интегральных датчиков давления для стабилизации параметров введены методики:

- пневмоциклирование датчиков при технологических испытаниях;
- определение кратковременной стабильности при проведении приемосдаточных испытаний.

Базовая конструкция датчика избыточного давления приведена на рис. 4.

Для определения показателей надежности интегральных датчиков, полученных с использованием методик для повышения стабильности характеристик, были проведены ускоренные испытания на безотказность. Проведение испытаний на безотказность предусматривало форсирование их режимов, приводящее к интенсификации физико-химических процессов без изменения основных механизмов отказов. В качестве ускоряющего фактора выбрана температура. В предположении активационного механизма старения (деградации), выражающегося в электродиффузии в проводниках и тепловом высвобождении дефектов в диэлектриках, расчет коэффициента ускорения для форсированного температурного режима выполнялся с использованием уравнения [5]

$$K_T = \exp \left[\frac{E_a}{k} \left(\frac{1}{(T_0 + \Delta T) + 273} - \frac{1}{(T_\phi + \Delta T) + 273} \right) \right], (1)$$

где K_T — коэффициент ускорения для диапазона температур от $T_0 + \Delta T$ до $T_\phi + \Delta T$; E_a — средняя энергия активации механизмов отказа, эВ; k — пос-



Рис. 4. Базовая конструкция датчика избыточного давления

тоянная Больцмана, $k = 8,6 \cdot 10^{-5}$ эВ/К; T_0 , T_ϕ — температура кристалла чувствительного элемента в градусах Цельсия при нормальных условиях эксплуатации и в форсированном режиме при ускоренных испытаниях на безотказность соответственно; ΔT — температура перегрева чувствительного элемента в градусах Цельсия.

Испытания на безотказность проводились с использованием одноступенчатого метода однократной выборки 20 штук однотипных датчиков избыточного давления с номинальным значением давления 10 кПа при повышенной температуре 90 °С. Для испытываемой выборки датчиков исходные значения параметров находились в диапазоне $U_0 = -0,5...4,5$ мВ, $\Delta U_{\text{вых}} = 47...53$ мВ.

Оснастка с образцами датчиков устанавливалась в камере теплоты и холода ТВТ-2. Напряжение питания составляло $U_{\text{пит}} = (7 \pm 0,1)$ В. План испытаний не предусматривал восстановления и замену образцов, отказавших во время испытаний. Испытания прекращались по истечении ~1460 ч. Измерения параметров проводились перед началом испытаний на безотказность при температуре 20 ± 1 °С, а также в процессе их испытания через 100, 200, 500, 1000 ч и в конце испытаний после выдержки их в течение 60 мин при температуре (20 ± 1) °С. Для каждого образца контролировалось значение выходного напряжения в отсутствии давления (U_0) и изменение выходного напряжения при номинальном давлении ($\Delta U_{\text{вых}}$). Измерения проводились на оборудовании ЦКП "Функциональный контроль и диагностика микро- и наносистемной техники" на базе НПК "Технологический центр" при финансовой поддержке Минобрнауки России. За отказ датчика был выбрано значение

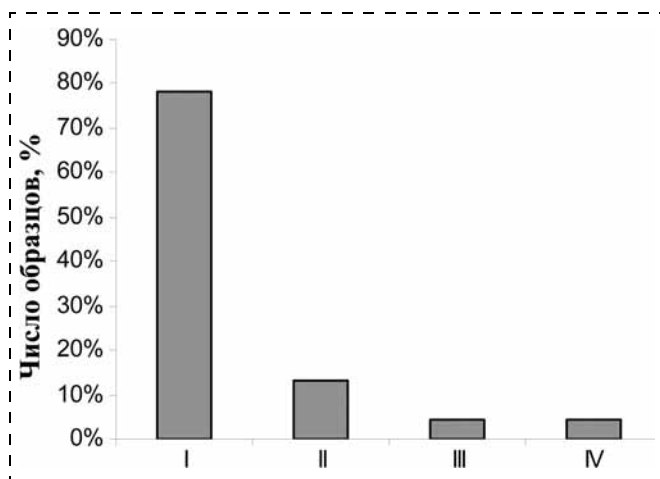


Рис. 5. Распределение образцов по величине относительного ухода δU_0 за 1460 ч ускоренных испытаний

ухода параметров на 1 %. За 1460 ч ускоренных испытаний при температуре 90 °С отказов не было. Распределение образцов по величине относительного ухода U_0 за 1460 ч ускоренных испытаний приведено на рис. 5: I — δU_0 от 0,016 до 0,1 %; II — δU_0 от 0,1 до 0,2 %; III — δU_0 от 0,2 до 0,5 %; IV — δU_0 от 0,5 до 1,0 %.

Анализ результатов показал, что за ≈ 1500 ч ускоренных испытаний уход "нуля" для всех образцов был менее 1 %, причем для 70 % образцов уход "нуля" был $\leq 0,1$ %, и только 3 % образцов имели уход от 0,5 до 1 %. Уход чувствительности (диапазона выходного напряжения при номинальном давлении) был значительно ниже и для всех образцов лежал в пределах до 0,05 %.

В предположении, что деградация параметров датчиков определяется отказами интегральных преобразователей давления (кристаллами ИПД), для оценки использовались данные, приведенные для интегральных микросхем в [5]. Соответственно, значение средней энергии активации составило 0,45 эВ для интервала температур 15...70 °С и 0,65 эВ для интервала температур 71...150 °С. Общий коэффициент ускорения равен произведению коэффициентов ускорения, рассчитанных для каждого диапазона температур. В соответствии с выбранными значениями энергии активации определены значения коэффициентов ускорения для интервалов температур 20...70 °С и 71...150 °С. Величина разогрева кристалла 0,5 °С.

Для первого из них, согласно (1), $K_{y1} = 13,4$. Аналогично, для второго коэффициента ускорения $K_{y2} = 3,15$. Отсюда общий коэффициент ускоренных испытаний на безотказность составил:

$$K_y = K_{y1} \cdot K_{y2} = 42,18. \quad (2)$$

Ускоренные испытания датчиков на безотказность работы длительностью 1464 ч при повышен-

ной температуре 90 °С позволяют оценить один из параметров надежности — минимальную наработку на отказ "в облегченном режиме", т. е. при нормальной (комнатной) температуре и при питании номинальным напряжением. В данном случае расчет времени минимальной наработки приводит к следующему результату:

$$t_{\text{мин.нар}} = K_y T_{\text{исп}} \approx 61\,744 \text{ ч}. \quad (3)$$

В результате испытаний на надежность 20 образцов датчиков, которые можно считать однотипными изделиями, определялся срок службы. Суммарная наработка составила:

$$t_{\Sigma} = K_y \sum_{K=1}^{20} T_{\text{исп}} = 1,235 \cdot 10^6 \text{ ч}. \quad (4)$$

В предположении экспоненциального закона распределения времени безотказной работы и доверительной вероятности оценки параметров надежности $\alpha_n = \alpha_b = 0,95$ нижняя и верхняя границы интенсивности отказов определялись с использованием таблицы квантилей $\chi^2_{(1-\alpha_n)(v)}$, $\chi^2_{(\alpha_b)(v)}$ — распределения, в которых параметрами являются вероятность α и число степеней свободы $v = 2n$, где n — число испытываемых однотипных образцов [6]. При определении пользовались таблицей квантилей в зависимости от α и v . В нашем случае $v = 40$. Находим по таблице соответствующие квантили:

$$\chi^2_{(0,05), (40)} = 31,4; \quad \chi^2_{(0,95), (40)} = 10,9.$$

Тогда нижняя и верхняя доверительные границы интенсивности отказов определяются выражениями

$$\bar{\lambda}_n = \frac{\chi^2_{(0,05), (40)}}{2t_{\Sigma}} = 12,7 \cdot 10^{-6} \text{ 1/ч}; \quad (5)$$

$$\bar{\lambda}_b = \frac{\chi^2_{(0,95), (40)}}{2t_{\Sigma}} = 4,4 \cdot 10^{-6} \text{ 1/ч}. \quad (6)$$

Средняя интенсивность отказов вычисляется по формуле:

$$\lambda_c = 0,5(\bar{\lambda}_b + \bar{\lambda}_n). \quad (7)$$

Для вышеуказанных значений она составляет величину $\lambda_c \approx 8,6 \cdot 10^{-6} \text{ 1/ч}$.

Рассчитанная средняя наработка датчика на отказ составила

$$T_0 = 1/\lambda_c = 13,3 \text{ г}. \quad (8)$$

Значения нижней и верхней доверительных границ средней наработки на отказ при доверительной вероятности 0,95 составили:

$$T_{0н} = 1/\lambda_{с.н} = 78\,655 \text{ ч} = 9 \text{ лет}; \quad (9)$$

$$T_{0в} = 1/\lambda_{с.в} = 226\,586 \text{ ч} = 25,9 \text{ лет}. \quad (10)$$

Таким образом, эксперимент по ускоренной деградации и приведенный расчет позволили оценить норму минимальной наработки на отказ, ограничивающую испытание на долговечность. Она составила 61 744 ч. Расчетный средний срок службы интегрального датчика давления с вероятностью 0,95 составил 13,3 года.

Заключение

Разработанные и внедренные в производство датчиков давления и акселерометров технологические методики с использованием контрастного слоя, изотропного травления, а также методики контроля толщины упругого подвеса, формирова-

ния мембран толщиной менее 35 мкм и другие позволили увеличить стабильность крутизны МЭМС-акселерометров на 56 %, увеличить время минимальной наработки на отказ МЭМС-датчиков давления до 61 744 ч.

Список литературы

1. **Микроэлектронный** датчик давления: Патент. 2169912 РФ. № 2000107624/28; заявл. 30.03.2000; опубл. 27.06.2001.
2. **Интегральный** преобразователь давления: Патент 2362132 РФ. № 2007148421/28; заявл. 27.12.2007; опубл. 20.07.2009. Бюл. № 20.
3. **Амеличев В. В., Данилова Н. Л., Панков В. В., Тарасов В. А.** Конструктивно-технологический базис многовариантного производства интегральных полупроводниковых тензопреобразователей // Нано-и микросистемная техника. 2007. № 3. С. 2—4.
4. **Дягилев В. В., Михайлов Ю. А., Игнатьева Е. В., Шешукова С. Ю.** Некоторые результаты освоения и совершенствования производства кристаллов кремниевых интегральных тензопреобразователей // Нано-и микросистемная техника. 2007. № 3. С. 17—22.
5. **РД11 0755—90.** Микросхемы интегральные. Методы ускоренных испытаний на безотказность и долговечность.
6. **Корн Г., Корн Т.** Справочник по математике. М.: Наука. 1978. 625 с.

УДК 681.586.674

И. И. Гончар, канд. техн. наук,
вед. науч. сотр.,
Л. Н. Киселев, канд. техн. наук, гл. конструктор,
А. Н. Михайлов, д-р техн. наук, нач. отделения,
В. Г. Певгов, канд. техн. наук, нач. отд.,
А. В. Семенов, канд. техн. наук, нач. отд.,
В. А. Шубарев, д-р техн. наук, проф,
ген. директор
ОАО "Авангард", Санкт-Петербург,
e-mail: avangard@avangard.org

ТЕРМОРЕЗИСТОРНЫЕ ДАТЧИКИ ИЗМЕРЕНИЯ ИЗМЕНЕНИЙ УРОВНЯ КРИОГЕННЫХ СРЕД

Поступила в редакцию 24.05.2012

Приведены результаты исследования изготовленных на тонких теплоизоляционных подложках по микроэлектронной технологии терморезисторных датчиков измерения уровня в криогенных средах.

Ключевые слова: терморезисторы, сенсоры, датчики уровня, уровнемеры, время задержки, чувствительность

Первые датчики уровня жидких сред, построенные на эффекте изменения сопротивления резистора при пересечении резистором границы жидкость — газ, были выполнены на полупроводниковых элементах и проволочных резисторах и описаны в работах [1, 2]. Такие датчики регистрировали изменение уровня в рабочей точке с большой за-

держкой и поэтому не нашли широкого применения.

Для уменьшения времени задержки, определяемого изменением сопротивления и достижения им порогового значения, условно соответствующего границе жидкость—газ, необходимо увеличить температуру нагретого тела резистора и уменьшить его габаритные размеры.

Использование микроэлектронной технологии для изготовления пленочных резисторов на тонких теплоизоляционных подложках позволяет значительно уменьшить размеры резистора и реализовать повышение температуры нагретого тела более 40 °С относительно температуры окружающей среды при токе нагрева не более 20 мА.

На значения сопротивлений тонкопленочных резисторов существенное влияние оказывают погрешности формирования рисунка [3, 4], поэтому при изготовлении пленочных резисторов были использованы прецизионные фотошаблоны.

На рис. 1 представлены подложки с пленочными резисторами, изготовленные на тонкой полиимидной подложке 2 × 8 × 0,04 мм (рис. 1, а) и кремневой подложке 3 × 3 × 0,4 мм с использованием мембранной технологии, с толщиной мембраны 2 мкм (рис. 1, б), подложки установлены на печатных платах.

Для снижения влияния смачивания на быстроедействие пленочный резистор на полиимидной подложке смещен к краю подложки.

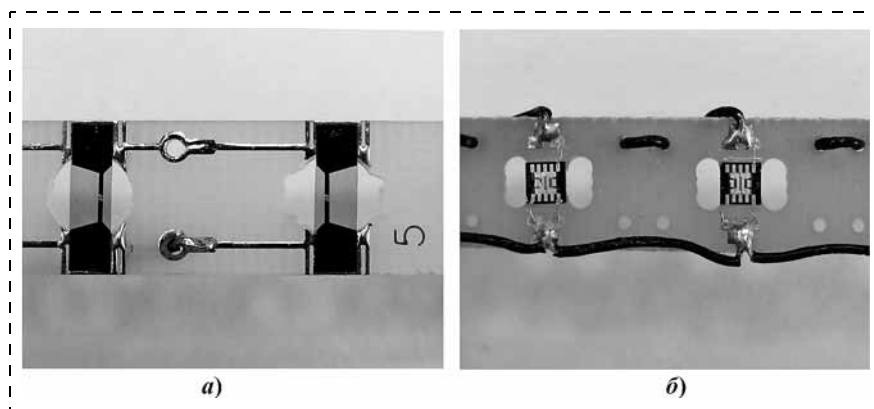


Рис. 1. Подложки с пленочными резисторами, используемые в качестве терморезисторных чувствительных элементов датчиков контроля уровня

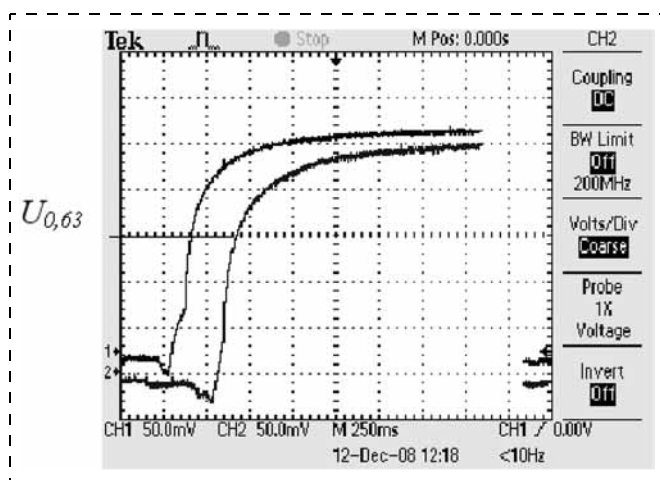


Рис. 2. Осциллограмма изменения сигнала в диагоналях измерительных мостов при пересечении границы жидкость — газ двумя терморезисторными ЧЭ

Для измерения изменений сопротивлений терморезисторных чувствительных элементов (ЧЭ) удобно использовать балансную схему, в одно из плеч которой включен ЧЭ. По изменению напряжения в диагонали балансного моста можно определить чувствительность и быстродействие терморезисторных ЧЭ и оценить возможность их использования для измерения изменений уровня в

контрольной точке места установки элемента. Резисторы в такой схеме выбирают из условия обеспечения потребления малой мощности и рассчитывают с использованием вольт-амперных характеристик по методике, описанной в работе [1].

В результате испытаний в жидком азоте установлено, что ЧЭ, изготовленные на кремневой мембране с платиновыми резисторами, имеют большее значение задержки сигнала, в среднем на 40 %, несмотря на высокую температуру нагрева и потребляемую мощность, за счет влияния смачивания и об-

разования капли в глухом отверстии под пленочным резистором. Для уменьшения влияния смачивания пленочный резистор на тонкой полиимидной пленке смещен к краю подложки [5, 6].

На рис. 2 представлена осциллограмма изменения сигнала в диагонали балансного моста при пересечении границы жидкость — газ в азоте двумя терморезисторными ЧЭ с титановыми терморезисторами, расположенными на расстоянии 1 мм друг от друга.

Время задержки, определяемое по уровню 0,63 изменения напряжения относительно максимального значения, при токе нагрева 8 мА в воздухе и нормальной температуре окружающей среды составляет не более 0,2 с.

ЧЭ датчиков контроля уровня, изображенные на рис. 1, были испытаны в среде жидкого водорода и азота.

Для испытаний был использован сосуд Дьюара с двумя вертикальными окнами для визуального наблюдения положения ЧЭ относительно уровня жидкого компонента. Перемещение ЧЭ, прикрепленных к штанге, осуществлялось с использованием микрометрического механизма. Результаты испытаний приведены в табл. 1 и 2.

В табл. 1 использованы следующие обозначения: R_0 — сопротивление чувствительного эле-

Таблица 1
Результаты испытаний в жидком азоте (ЧЭ 11-15 на подложке с титановыми резисторами, ЧЭ 21-25 на мембране с платиновыми резисторами)

№ ЧЭ	R_0 , Ом	I_B , мА	U_B , мВ	R_B , Ом	I_h , мА	U_h , мВ	$R_{п}$, Ом	$I_{п}$, мА	$U_{п}$, мВ	$R_{п}$, Ом
11	156	5,7	986	173	8,4	704	84	7,0	857	122
12	157	5,7	986	173	8,4	707	84	7,4	820	111
13	157	5,7	987	174	8,4	706	84	7,2	832	115
14	156	5,7	985	174	8,4	705	84	7,2	838	117
15	144	5,9	956	162	7,8	678	78	7,8	777	100
21	81	8,3	716	86	10,4	499	48	9,5	598	63
22	80	8,3	710	85	10,4	493	47	9,4	600	64
23	81	8,3	712	86	10,4	499	48	9,3	620	67
24	83	8,2	717	87	10,3	504	49	9,2	623	68

Таблица 2

Результаты испытаний в жидком водороде
(ЧЭ 11-15 на подложке с титановыми резисторами,
ЧЭ 21-25 на мембране с платиновыми резисторами)

№ ЧЭ	R_o , Ом	I_h , мА	U_h , мВ	R_h , Ом	$I_{п.}$, мА	$U_{п.}$, мВ	$R_{п.}$, Ом
11	156	8,7	671	77,1	9,2	623	68
12	157	8,78	668	75,9	9,2	624	68
13	157	8,4	665	75,8	9,2	624	68
14	156	8,4	662	75,1	9,4	625	68
15	144	7,8	636	70,2	9,4	595	63
21	81	10,8	458	42	11	434	39
22	80	10,8	450	41	11	431	39
23	81	10,8	452	42	11	433	39
24	83	10,7	465	43	11	443	41

мента при температуре 20 °С; I_b , U_b , R_b — ток нагрева, напряжение на чувствительном элементе и его сопротивление в воздухе; I_h , U_h , R_h — ток нагрева, напряжение на чувствительном элементе и его сопротивление в жидкости; $I_{п.}$, $U_{п.}$, $R_{п.}$ — ток нагрева, напряжение на чувствительном элементе и его сопротивление в парах над зеркалом жидкости.

Изменение напряжения на сопротивлении чувствительного элемента, изготовленного на мембране с платиновым резистором, при пересечении ЧЭ границы жидкость — газ в азоте при токе нагрева не более 10,5 мА в жидкости, составляет не менее 110 мВ.

Изменение напряжения на сопротивлении чувствительного элемента, изготовленного на подложке из полиимида с титановым резистором при пересечении им границы жидкость — газ в азоте при токе нагрева не более 8,5 мА в жидкости, составляет не менее 130 мВ.

В табл. 2 использованы те же обозначения, что и в табл. 1.

Изменение напряжения при переходе чувствительным элементом, изготовленным на подложке с титановыми резисторами, границы жидкость — газ в водороде при токе нагрева не более 9,5 мА в жидкости составляет не менее 45 мВ. При увеличении тока нагрева в жидкости до 11 мА изменение напряжения при переходе ЧЭ границы жидкость — газ в водороде составляет не менее 75 мВ.

Изменение напряжения при переходе чувствительным элементом, изготовленным на мембране с платиновыми резисторами, границы жидкость — газ в водороде при токе нагрева не более 11 мА в жидкости, составляет не менее 20 мВ.

Изменение сигнала при прецизионном вертикальном перемещении с шагом 0,2 мм ЧЭ через поверхность жидкого водорода представлено на рис. 3.

Изменения сигнала при перемещении чувствительных элементов, изготовленных на подложке с титановыми резисторами, соответствуют точкам на

кривых I , I' при токах нагрева в жидком водороде 9,2 и 10,6 мА соответственно.

Изменения сигнала при перемещении чувствительных элементов, изготовленных на подложке с мембраной и платиновыми резисторами, соответствуют точкам на кривых 2, 2' при токах нагрева в жидком водороде 11 и 13,1 мА соответственно.

При переходе границы жидкость—газ в жидком водороде чувствительные элементы, изготовленные на подложке с титановыми резисторами, имеют достаточно высокую пространственную чувствительность 0,2 мм при изменении значения ≥ 70 мВ, что позволяет их использовать в датчиках контроля уровня жидкого водорода при токе нагрева не менее 11 мА в жидкости.

ЧЭ, изготовленные на подложке с мембраной и платиновыми резисторами, имеют меньшую чувствительность и большее значение задержки (более 10 с), поэтому их использование в датчиках измерения изменений уровня нецелесообразно.

На основании экспериментальных результатов был разработан и изготовлен датчик измерения изменений уровня криогенных жидкостей.

Датчик содержит корпус, печатную плату, подложку с терморезистором, соединительные провода. Печатная плата крепится к основанию корпуса, а у края противоположной не закрепленной стороны выполнено отверстие, над которым размещена подложка с терморезистором.

Проводники, проходящие через отверстие в основании корпуса, служат для подачи напряжения питания на терморезистор. Три резьбовых отверстия в корпусе предназначены для крепления датчиков и выполнены таким образом, чтобы исключить возможность неправильной установки терморезистора, обеспечивая минимальное время задержки. Внешний вид датчика приведен на рис. 4, слева — защитный кожух, в центре — печатная плата с установленной подложкой, на которой расположен смещенный к краю терморезистор, спра-

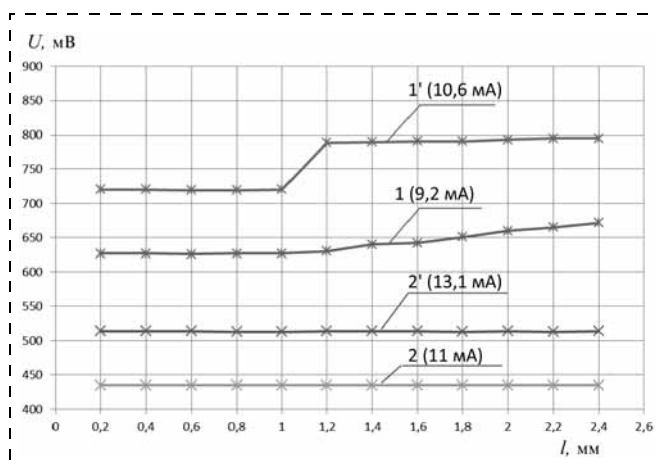
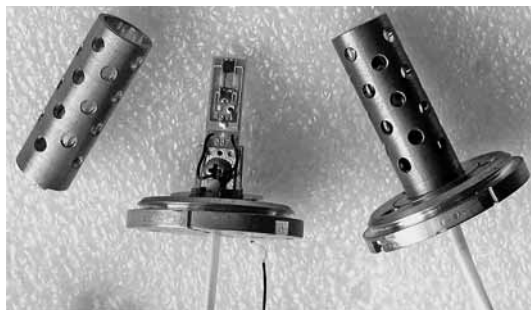


Рис. 3. Изменение сигнала при перемещении ЧЭ через поверхность жидкого водорода

Рис. 4. Датчик контроля уровня с терморезисторным чувствительным элементом



ва — датчик контроля уровня в корпусе.

Для обеспечения измерения расхода жидкостей в процессе эксплуатации криогенных систем датчики установлены в сосуды в заданных контрольных точках. Датчики, изготовленные в соответствии с изображением на рис. 4, были установлены в баке и размещены на боковых стенках бака в контрольных точках (рис. 5).

На приведенном рисунке датчики контроля уровня обозначены ДПУ и расположены практически симметрично на одном уровне на противоположных стенках бака в контрольных точках.

На рис. 6 представлены результаты измерений изменений уровня в жидком кислороде с использованием датчиков, изображенных на рис. 5, при токе нагрева 2 мА.

При проведении пробной заправки изделия датчики ДПУ срабатывали поочередно по мере заполнения бака компонентом. При штатной заправке изделия датчики ДПУ срабатывали в соответствии с графиками, приведенными на рис. 6.

На графике четко видна последовательность срабатывания датчиков ДПУ в соответствии с их размещением по баку (см. рис. 5).

Также видно одновременное срабатывание датчиков, размещенных на стенках бака на одном уровне, что указывает о "спокойном" положении "зеркала" компонента топлива при заправке.

Использование терморезисторных датчиков измерения уровня позволяет не только обеспечить высокую точность определения уровня в контрольной точке при снижении массогабаритных параметров по сравнению с емкостными и индуктивными аналогами, но и значительно упростить схему измерения параметров [7].

Разработанные датчики с терморезисторными чувствительными элементами успешно прошли испытания на функционирование в криогенных средах — азоте, кислороде и водороде. Малые габаритные размеры, низкий уровень потребляемой

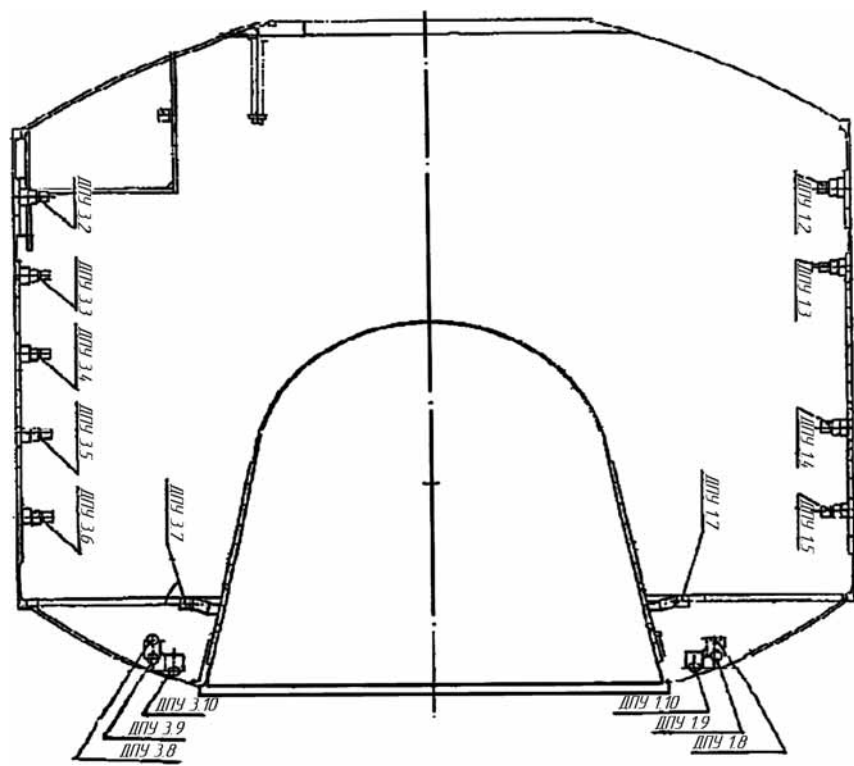


Рис. 5. Размещение датчиков контроля уровня в баке кислорода

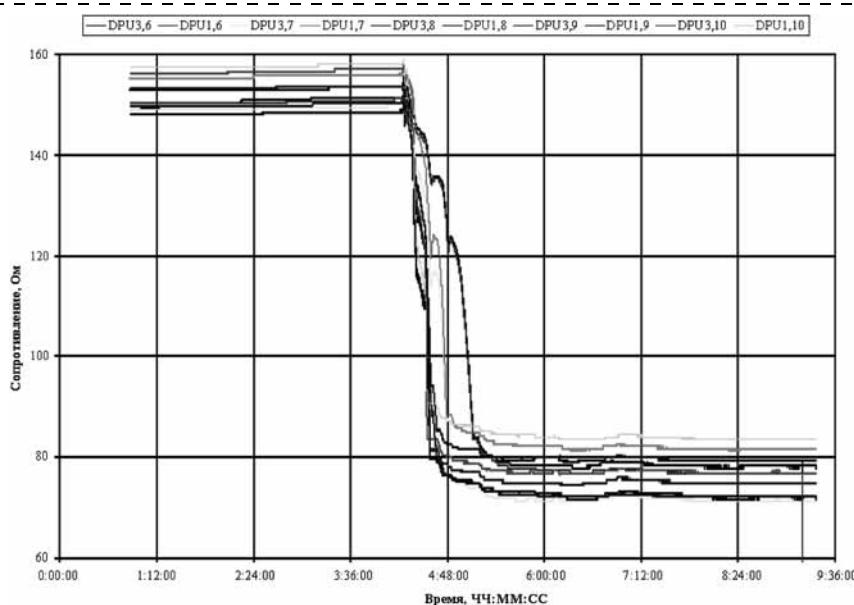


Рис. 6. Изменение сопротивлений датчиков контроля уровня при заправке бака жидким кислородом

мощности, высокая чувствительность и быстрое действие позволяют широко их использовать для контроля уровня жидких сред.

Список литературы

1. Удалов Н. П. Полупроводниковые датчики. М.: Энергия, 1965.
2. Виглеб Г. Датчики. М.: Мир, 1989.
3. Спиринов В. Г. Анализ технологических погрешностей сопротивления тонкопленочного резистора // Нано- и микросистемная техника. 2009. № 9. С. 42—45.
4. Спиринов В. Г. Исследование погрешности сопротивления тонкопленочного резистора, вызванной исключением

контактных площадок перекрытия резистивного и проводящего слоев // Нано- и микросистемная техника. 2008. № 11. С. 44—46.

5. Датчик контроля уровня жидкости: пат. RU2295115 / Гончар И. И., Киселёв Л. Н., Певгов В. Г., Семенов А. В., Шубарев В. А.; заявл. 02.07.2004.

6. Датчик контроля уровня жидкости. RU2310173 / Гончар И. И., Киселёв Л. Н., Певгов В. Г., Семенов А. В., Шубарев В. А.; заявл. 12.05.2006.

7. Способ контроля дискретных уровней жидкости и система (устройство), обеспечивающая его реализацию. RU23191143 / Гончар И. И., Киселёв Л. Н., Сеницын В. В., Шубарев В. А.; заявл. 16.10.2006.

УДК 621.3.049; 621.3.082

Ю. З. Бубнов, д-р. техн. наук., проф.,
гл. конструктор,
Л. Н. Вишневик, канд. техн. наук, гл. технолог,
И. В. Сердюк, вед. инженер,
М. С. Смирнов, инженер,
ОАО "Авангард", г. Санкт-Петербург
e-mail: avangard@avangard.org

ПОЛУПРОВОДНИКОВЫЕ ГАЗОВЫЕ СЕНСОРЫ С МЕМБРАННОЙ СТРУКТУРОЙ ДЛЯ ПОЖАРНЫХ ИЗВЕЩАТЕЛЕЙ

Поступила в редакцию 06.06.2012

Показана востребованность на рынке современных комбинированных пожарных извещателей, содержащих газовый сенсорный модуль. Для данного модуля предложен полупроводниковый сенсор, содержащий мембранную структуру.

Приведены результаты испытаний полупроводникового сенсора с мембранной структурой.

Ключевые слова: пожарный извещатель, датчик пожарного извещателя, сенсор полупроводниковый

Введение

В настоящее время актуальной является задача обнаружения пожаров на ранней стадии их возникновения. Для этой цели в пожарных извещателях (ПИ) используются полупроводниковые газовые сенсоры, которые дают информацию о веществах, выделяемых при раннем тлении, так как выделяемые на этой стадии монооксид углерода (СО) и водород (H₂) могут быть зафиксированы полупроводниковой газочувствительной структурой. Анализ возможных типов сенсоров для ПИ показал, что именно полупроводниковые газовые сенсоры являются наиболее перспективными, так как

они обладают очень низким порогом чувствительности к вышеприведенным газам [1]. Одним из важнейших параметров сенсоров для ПИ является низкое энергопотребление, поскольку они должны функционировать и при отключенном сетевом электропитании. Наиболее низкое энергопотребление обеспечивается в полупроводниковых сенсорах с применением мембранных структур толщиной 2...4 мкм при импульсном электропитании нагревательного элемента.

Существующие сегодня объемы рынка ПИ требуют создания массового производства газовых сенсоров и датчиков на их основе [2, 3].

Основными требованиями к полупроводниковому сенсору являются высокая чувствительность к малым концентрациям газа, низкая потребляемая мощность и длительный ресурс работы, в том числе в атмосфере, содержащей примеси негативно воздействующие на сенсор [1, 6].

Задача создания полупроводникового сенсора была успешно решена в ОАО "Авангард", г. Санкт-Петербург, при создании сенсоров серии СПГ [4].

Конструкция сенсора серии СПГ (сенсор полупроводниковый газовый)

В разрезе кристалл сенсора состоит из ряда технологически отдельно выполненных слоев. Структура кристалла сенсора по слоям представлена на рис. 1.

Конструкционной основой кристалла сенсора является монокристаллический кремний, как правило, *n*-типа, что связано с возможностью глубокого анизотропного травления его тыльной стороны для формирования мембранных структур. Кремниевая подложка пассивируется слоем двуоксида кремния, получаемым методом термического окисления. Нагревательный элемент сенсора выполнен из поликристаллического кремния. Для получения требуемой проводимости ($22,5 \pm 7,5 \text{ Ом/см}^2$) поли-

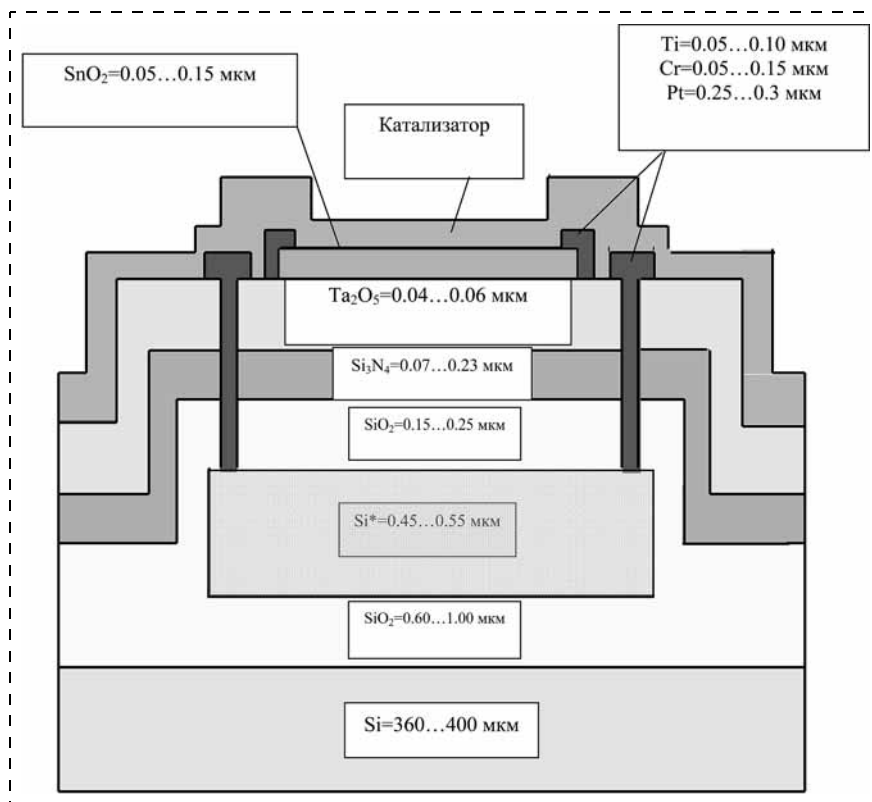


Рис. 1. Структура кристалла микросенсора

кремневый слой легируется примесями из растворных пленок в диффузионной системе. Нагревательный элемент отделен от газочувствительного элемента трехслойным диэлектриком: диоксидом кремния SiO_2 ; нитридом кремния Si_3N_4 ; пятиоксидом тантала Ta_2O_5 .

Использование Ta_2O_5 в качестве диэлектрического слоя применительно к газовым сенсорам является оригинальным конструктивно-технологическим решением специалистов ОАО "Авангард". Использование Ta_2O_5 совместно с другими диэлектрическими слоями обеспечивает практически 100 %-ное отсутствие прямого контакта между нагревательным и газочувствительным элементами.

Газочувствительный слой выполняется на основе диоксида олова (SnO_2), легированного растворными пленками донорно-акцепторных примесей: сурьмы и гадолиния. Такой выбор легирующих примесей определяется необходимостью создания требуемой проводимости (концентрации носителей) газочувствительного полупроводника и их стабилизирующими свойствами относительно различного рода деградационных процессов в слое SnO_2 . Металлизация сенсора выполнена из двух слоев: тонкого подслоя хрома, обеспечивающего омический контакт как к поликремнию, так и к диоксиду олова, и более толстого платинового слоя, обеспечивающего удовлетворительную приварку золотой проволоки к выходным контактным площадкам сенсора.

Введение в структуру газочувствительного слоя каталитических элементов является важным вопросом в технологии газовых сенсоров.

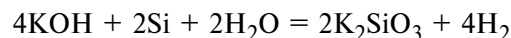
В ОАО "Авангард" этот вопрос решен оригинальным методом — формированием каталитических покрытий из растворных пленок на основе тетраэтоксисилана [5, 7], содержащих каталитические элементы. После термической обработки нанесенных центрифугированием растворных пленок на поверхности кристалла сенсора остаются слои SnO_2 с равномерно распределенными молекулами оксидов каталитических элементов.

Для снижения мощности, потребляемой сенсором, в кремневой подложке формируется мембранная структура с помощью анизотропного травления кремния в растворе KOH .

На рис. 2 дано схематическое изображение структуры, полученной при анизотропном травлении.

При взаимодействии кремния с

нагретым гидрооксидом калия по реакции



в качестве продукта реакции образуется силикат калия, который в виде студенистой массы покрывает зону травления и блокирует процесс. Для устранения этого явления применяют специальные перемешивающие устройства или, что наиболее предпочтительно, ультразвуковые ванны, улучшающие массообмен в реакторе.

На рис. 3 показана лицевая часть кристалла сенсора серии СПГ.

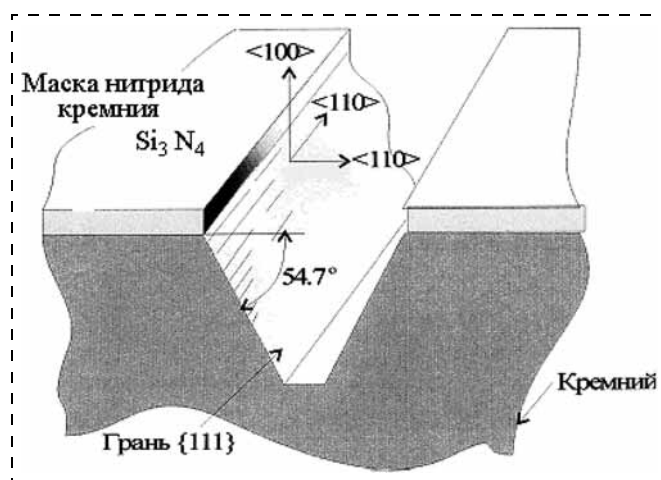


Рис. 2. Преимущественное травление кремния вдоль кристаллографических направлений $\langle 100 \rangle$ и $\langle 110 \rangle$

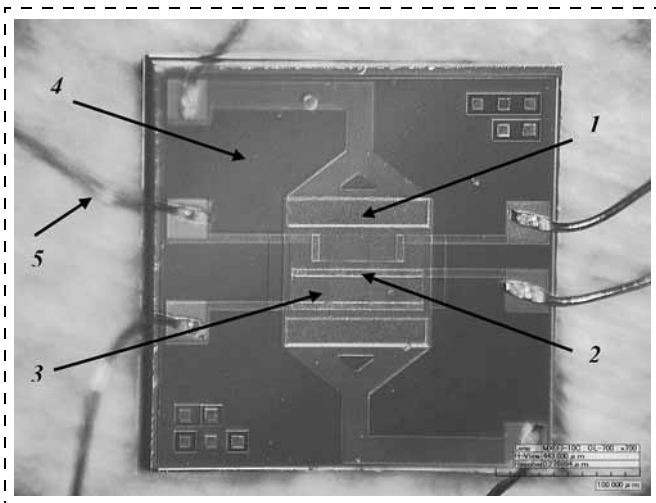


Рис. 3. Лицевая часть кристалла сенсора СПГ:

1 — поликремниевый нагреватель; 2 — измерительный электрод (Pt); 3 — газочувствительный слой $\text{Sn}_2 + \text{Gd} + \text{Sb}$ с каталитически-активным слоем, содержащим частицы Pt (2...4 нм), распределенные в SiO_2 матрице; 4 — кремниевый кристалл толщиной 300 мкм; 5 — токоподводы Pt

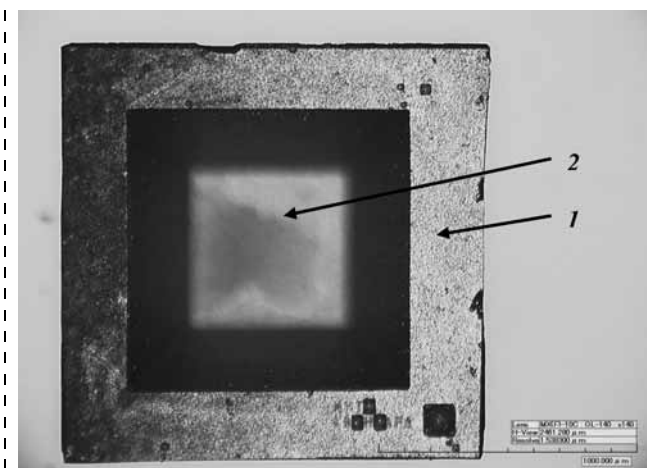


Рис. 4. Обратная сторона кристалла сенсора СПГ:

1 — "рамка" из кремния толщиной 300 мкм; 2 — мембрана Si_3N_4 —Si толщиной 2...3 мкм

На рис. 4 показана мембрана на основе Si_3N_4 толщиной 2...3 мкм, выполненная с внутренней стороны кристалла для снижения потребляемой мощности сенсора (до 40...50 мВт).

Исследование механической прочности и газочувствительных свойств сенсора СПГ

На изготовленных мембранных структурах были проведены исследования их стойкости к внешним воздействующим факторам: одиночным механическим ударам с амплитудой ускорения 10 г и синусоидальной вибрации в диапазоне частот 10...80 Гц с амплитудой ускорения 5 г. Испытания показали полное отсутствие отказов при указанных механических воздействиях.

Исследование диапазона чувствительности

Исследование диапазона чувствительности проводилось при воздействии на сенсор газоздушных смесей, содержащих CH_4 , CO , NO_x , NH_3 . Данные смеси были приготовлены на газосмесительной станции EASTGAS, которая представляет собой динамический газовый смеситель [4]. Принцип действия станции заключается в смешении потоков исходного газа и газа-разбавителя, расход которых регулируется и измеряется с помощью регуляторов массового расхода газа (масс-контроллеров). Требуемые значения расходов по каналам и значения молярной (объемной) доли компонентов в приготавливаемой смеси определяются с помощью ПЭВМ.

В рабочую камеру с сенсорами попеременно в течение 20 мин подавался синтетический воздух и целевой газ с различной концентрацией вплоть до заданного нижнего предела обнаружения. В качестве информативного параметра использовался отклик сенсора на целевой газ $Q = R_{ro}/R_{rc}$ для газов восстановительного типа $\text{CH}_4, \text{CO}, \text{NH}_3$ или $Q_1 = R_{rc}/R_{ro}$ для газа окислительного типа NO_x (в настоящих исследованиях использовался оксид азота NO). Ввиду того, что здесь R_{ro} и R_{rc} — сопротивление газочувствительного резистора в синтетическом воздухе и целевом газе соответственно, отклик сенсора Q является безразмерной величиной. Напряжение на нагревательном элементе в импульсе нагрева составляло 5,3 В, длительность импульсов нагрева и охлаждения 1,5 и 4,5 с соответственно. Все испытания проводились с использованием двух образцов сенсоров серии СПГ.

На рис. 5—8 приведены зависимости величины отклика сенсоров 1, 2 от концентраций соответствующих целевых газов. Отметим, что воздействие повышенных концентраций целевых газов не вызывало каких-либо деградационных явлений в сенсорах — характеристики сенсоров ос-

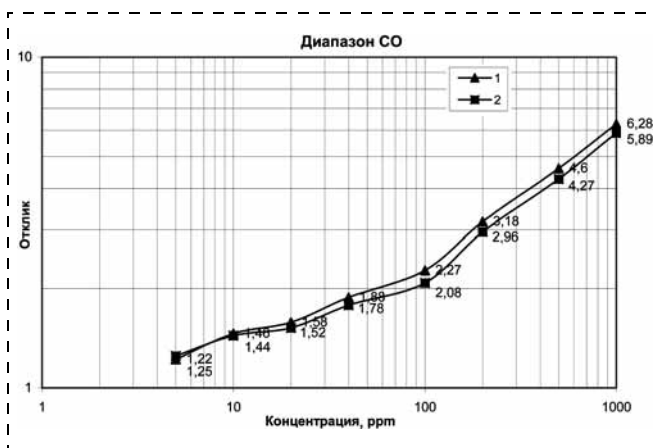


Рис. 5. Диапазон чувствительности сенсора на CO

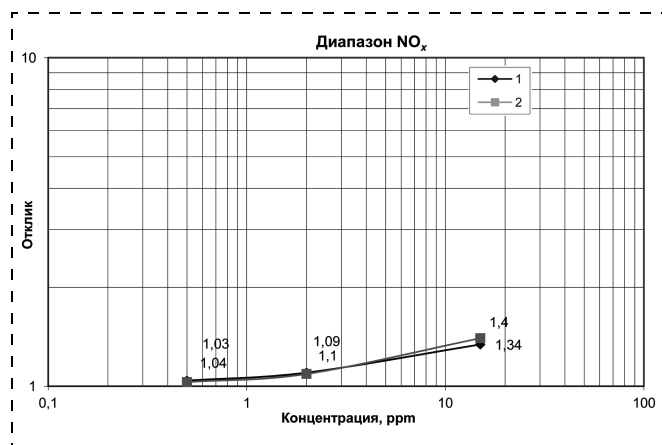


Рис. 6. Диапазон чувствительности сенсора на NO_x

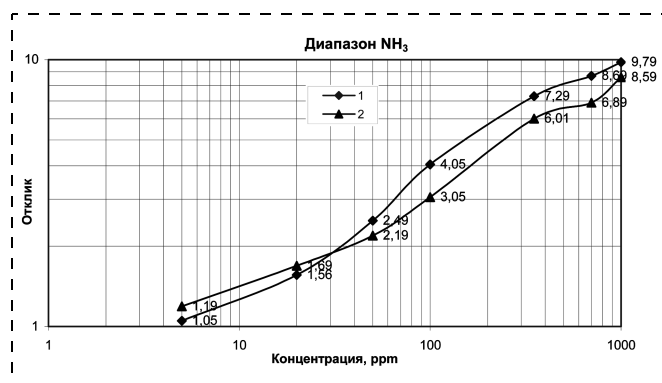


Рис. 7. Диапазон чувствительности сенсора на NH₃

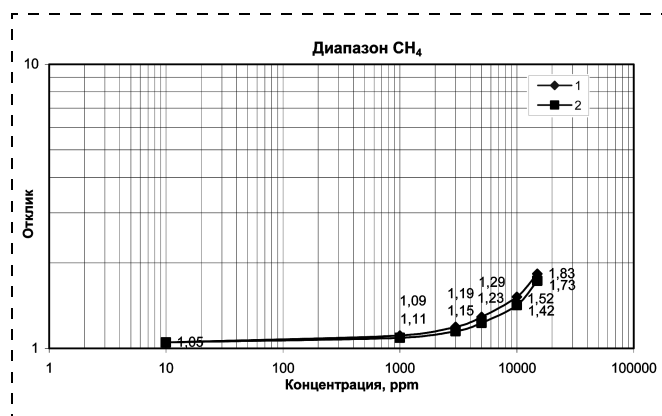


Рис. 8. Диапазон чувствительности сенсора на CH₄

тались практически на том же уровне, что и до указанных воздействий.

Исследование влияния относительной влажности

Исследование влияния относительной влажности на параметры сенсоров проводились в диапазоне изменения относительной влажности 34...90 %.

На рис. 9 показано влияние относительной влажности на величину отклика сенсора на 100 ppm CO.

Суммарные данные по основным параметрам сенсоров СПГ, полученные в результате испытаний, приведены в таблице.

Особенности изготовления сенсоров СПГ для различных применений

Разрабатываемые сенсоры серии СПГ могут быть применены в газовых течеискателях и пороговых газосигнализаторах [1].

При применении сенсоров в газовых течеискателях основным техническим параметром является нижний предел обнаружения газа.

При этом требования к стабильности нулевого уровня сигнала не высоки, поскольку существует возможность калибровки прибора перед проведе-



Рис. 9. Влияние относительной влажности на величину отклика сенсора на 100 ppm CO

Основные параметры сенсоров СПГ

Параметр	Значение параметра
Нижний предел обнаружения, ppm	
CH ₄	10
CO	5
NH ₃	5
NO _x	0,5
Размер кристалла сенсора, мм ² , не более	1,69
Число кристаллов сенсоров на пластине, не менее	1300
Сопротивление нагревательного элемента при комнатной температуре, Ом	30...40
Электрическое питание нагревательного элемента	Импульсное
Длительность импульса нагрева, с, не более	1,5
Скважность импульсов, не менее	4
Потребляемая мощность в импульсе нагрева, мВт, не более	400
Средняя потребляемая мощность, мВт, не более	80
Стабильность и воспроизводимость параметров сенсора при T = 25 °C и относительной влажности 50 %, %, не более	± 10
Изменение параметров сенсоров в диапазоне относительной влажности, 30...90 %, %, не более	± 15

нием работы. В связи с этим целесообразно изготовление сенсора с одним нагревательным и одним газочувствительным резисторами, монтируемыми в четырехвыводной транзисторный корпус типа ТО-5.

Для увеличения отклика сенсора на малые концентрации измеряемого газа должна быть максимально увеличена площадь поверхности газочувствительного элемента. Здесь возможно применение активного слоя газочувствительного элемента с площадью $0,1...0,12 \text{ мм}^2$ с топологическими размерами $100 \times 1000 \text{ мкм}$.

Размер активной области кристалла сенсора для течеискателя не превысит $1,0 \text{ мм}^2$. Сопротивление нагревательного поликремниевых резистора при комнатной температуре составит $30...40 \text{ Ом}$. Номиналы газочувствительных резисторов будут лежать в диапазоне $20...50 \text{ кОм}$. Потребляемая мощность в импульсе нагрева не превысит 300 мВт , а средняя мощность за рабочий цикл нагрев — охлаждение составит $75...100 \text{ мВт}$.

Пороговые газосигнализаторы, в отличие от течеискателей, предъявляют к сенсорам более высокие требования по стабильности и воспроизводимости параметров.

Основными дестабилизирующими факторами являются изменения температуры и относительной влажности окружающей среды в пределах, определенных техническим заданием.

Нейтрализация влияния температуры окружающей среды может быть достигнута аппаратными методами схемы управления за счет введения обратной связи от температурочувствительного элемента на нагревательный элемент. В качестве температурочувствительного элемента может использоваться поликремниевый нагревательный резистор, имеющий линейную зависимость сопротивления от температуры. Такое решение — наиболее простое, так как не требует введения дополнительных элементов и внешних выводов. Однако ввиду относительно низкого сопротивления нагревательного резистора ($30...50 \text{ Ом}$) и, соответственно, незначительного его изменения в заданном температурном интервале (десятичные доли Ом) схемотехнические решения по реализации такого варианта обратной связи весьма затруднительны.

Другим вариантом построения температурочувствительного элемента является применение отдельного поликремниевых или платинового терморезистора, формируемого на кристалле одновременно с изготовлением планарной структуры сенсора. В этом варианте номиналы терморезисторов могут составлять $1...5 \text{ кОм}$, а их отклонения в диапазоне вариации температуры $20...50 \text{ Ом}$, что существенно упрощает задачу реализации обратной связи.

Более сложной является задача нейтрализации дестабилизирующего действия влажности окружающей среды, изменение которой влечет за собой изменение сопротивления газочувствительных элементов, что приводит к дрейфу нулевого уровня, сравнимого с величиной отклика сенсора на целевой газ. Нейтрализация влияния изменения влажности окружающей среды нами решается путем интеграции на одном кристалле двух газочувствительных резисторов с каталитическим покрытием и без него, так что при одинаковой чувствительности к влажности один из резисторов ($R_{Г2}$) не чувствителен к целевому газу.

При выборе в качестве выходного параметра сенсора потенциала U_0 в средней точке делителя $R_{Г1}-R_{Г2}$ при напряжении питания $U_{П}$ обеспечивается дрейф нуля не более $\pm 5 \%$. Потенциал U_0 определяется выражением

$$U_0 = U_{П} k_n,$$

где

$$k_n = \frac{R_{Г1}}{R_{Г1} + R_{Г2}}.$$

При наличии температурной стабилизации и использовании в качестве выходного параметра сенсора величины, пропорциональной k_n , можно уверенно ожидать достаточной стабильности и воспроизводимости чувствительных характеристик пороговых сигнализаторов.

Указанные решения, а также применение платиновой металлизации и введения стабилизирующих примесей в структуру диоксида олова позволяют рассчитывать на выполнение требований по безотказности функционирования сенсоров.

Список литературы

1. Бубнов Ю. З., Голиков А. В., Казак А. В. Полупроводниковые газовые сенсоры и газоаналитические приборы на их основе // Электроника: Наука. Технология. Бизнес. 2008. № 10. С. 72—77.
2. Голиков А. В., Шубарев В. А. Системы пожарной безопасности с газовыми сенсорными модулями // Электроника: Наука. Технология. Бизнес. 2008. № 10. С. 78—80.
3. Васильев А., Олихов И., Соколов А. Газовые сенсоры для пожарных извещателей // Электроника: Наука. Технология. Бизнес. 2005. № 2. С. 24—27.
4. ОАО "АВАНГАРД" — главная страница [Электронный ресурс] / Официальный портал ОАО "Авангард". URL: <http://www.avangard.org/>, свободный.
5. Максимов А. И., Мошников В. А., Таиров Ю. М., Шилова О. А. Основы золь-гель технологии нанокompозитов. СПб.: Элмор, 2008.
6. Таратын И. А., Постарнаков С. В., Сердюк И. В. Унифицированные датчики пожарных извещателей систем безопасности, раннего предупреждения возгораний // Вопросы радиоэлектроники. М., 2012. Вып. 1. С. 123—130.
7. Шилова О. А., Чепик Л. Ф., Бубнов Ю. З. Свойства пленок, получаемых из растворов на основе тетраэтоксисилана, в зависимости от технологических аспектов их формирования // ЖПХ. 1995. Т. 68. Вып. 10. С. 1608—1612.

А. Н. Михайлов, д-р техн. наук, нач. отд.,
В. Н. Косинский, нач. отд.,
 ОАО "Авангард", г. Санкт-Петербург,
 e-mail: avangard@avangard.org

ДАТЧИКИ ДЕФОРМАЦИИ И СИСТЕМЫ МОНИТОРИНГА КОНСТРУКЦИОННОЙ БЕЗОПАСНОСТИ ЗДАНИЙ И СООРУЖЕНИЙ

Поступила в редакцию 05.06.2012 г.

Показано применение технологии беспроводных систем мониторинга в области обеспечения конструкционной безопасности зданий и сооружений и представлена разработанная специалистами ОАО "Авангард" беспроводная система мониторинга деформации. Показана технология, обеспечивающая повышение комплексной безопасности зданий и сооружений через повышение информативности и надежности системы мониторинга деформации как одного из элементов комплексной безопасности. Рассматривается устройство вновь разрабатываемого в рамках программы Союзного государства "Микросистемотехника" индукционного первичного преобразователя для датчика деформации беспроводной системы мониторинга деформации.

Ключевые слова: система мониторинга конструкций, датчики, индукционный ПП, программное обеспечение

Одной из важнейших задач современного общества является обеспечение безопасности жизнедеятельности человека, повышение качества жизни человека и предотвращение техногенных катастроф. Но в системах жизнеобеспечения жилых и промышленных зданий и сооружений безопасность фигурирует обычно только в виде контроля надежности эксплуатации инженерных систем в сочетании с охранными системами. И здесь возникает парадокс в подходе к обеспечению безопасности, поскольку первичная система, система мониторинга конструкционного состояния (напряженно-деформированного состояния здания), как правило, не присутствует в наборе систем контроля.

Решением данной проблемы может быть установка систем мониторинга конструкционной безопасности зданий, сооружений, тоннелей, мостов и т. п. с дистанционным сбором информации.

Система мониторинга конструкций предполагает установку различных датчиков на элементах конструкций зданий и сооружений в целях определения воздействия на них окружающей среды и нагрузок (статическая, сейсмическая и ветровая) и включает набор датчиков (температуры, деформа-

ции, прогиба, наклона, ускорения колебаний, влажности, коррозии).

Система мониторинга предназначена для непрерывной работы длительный период времени, от нескольких месяцев до нескольких лет. Наиболее широко для этой цели применяют проводные и более редко беспроводные системы мониторинга. Однако в подобных системах мониторинга используются стандартные датчики и системы сбора и передачи информации, которые не только сложны к установке на конструкциях, но и дороги. Например, один акселерометр с преобразователем может стоить несколько сотен долларов, а система сбора информации в целом и соединительные кабели для каждого датчика от 1000 до 2000 евро [1]. Это означает, что стандартные системы мониторинга, включающие большое число датчиков, являются дорогостоящими и поэтому их устанавливают, как правило, на ответственных сооружениях, подобных железнодорожным или автомобильным мостам.

Однако в последнее время были разработаны новые технологии, которые оказываются существенно дешевле при их использовании для мониторинга конструкций. Одной из подобных технологий являются беспроводные системы передачи информации с датчиков, которые размещают на определенных, наиболее опасных, элементах конструкций зданий или сооружений [2].

На основе многолетнего опыта собственных научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ в области создания приборов специалистами ОАО "Авангард" была разработана беспроводная система мониторинга деформации (СМД) и с учетом рекомендаций ОАО "ЦНИИС" НИЦ "Тоннели и метрополитены" измерительные устройства — первичные преобразователи (ПП). Разработанное оборудование предназначено для оперативного контроля напряженно-деформированного состояния конструкций зданий и сооружений.

Беспроводная система мониторинга включает несколько различных компонентов, которые представлены на рис. 1.

Система мониторинга должна обеспечивать передачу данных с контролируемых конструкций без визуального их осмотра. Данные измерений с датчиков могут передаваться к пользователю различными путями, например через Интернет или GSM-канал связи. Несколько датчиков объединены в сеть, образуя "узлы", которые имеют источник питания и могут передавать самостоятельно информацию только на небольшие расстояния. Поэтому на объекте устанавливают центральное устройство — координатор сети, который собирает и хранит информацию в базе данных, а также осуществляет передачу ее в центр мониторинга или ситуационный центр для обобщения, анализа и прогнозирования поведения объектов контроля.

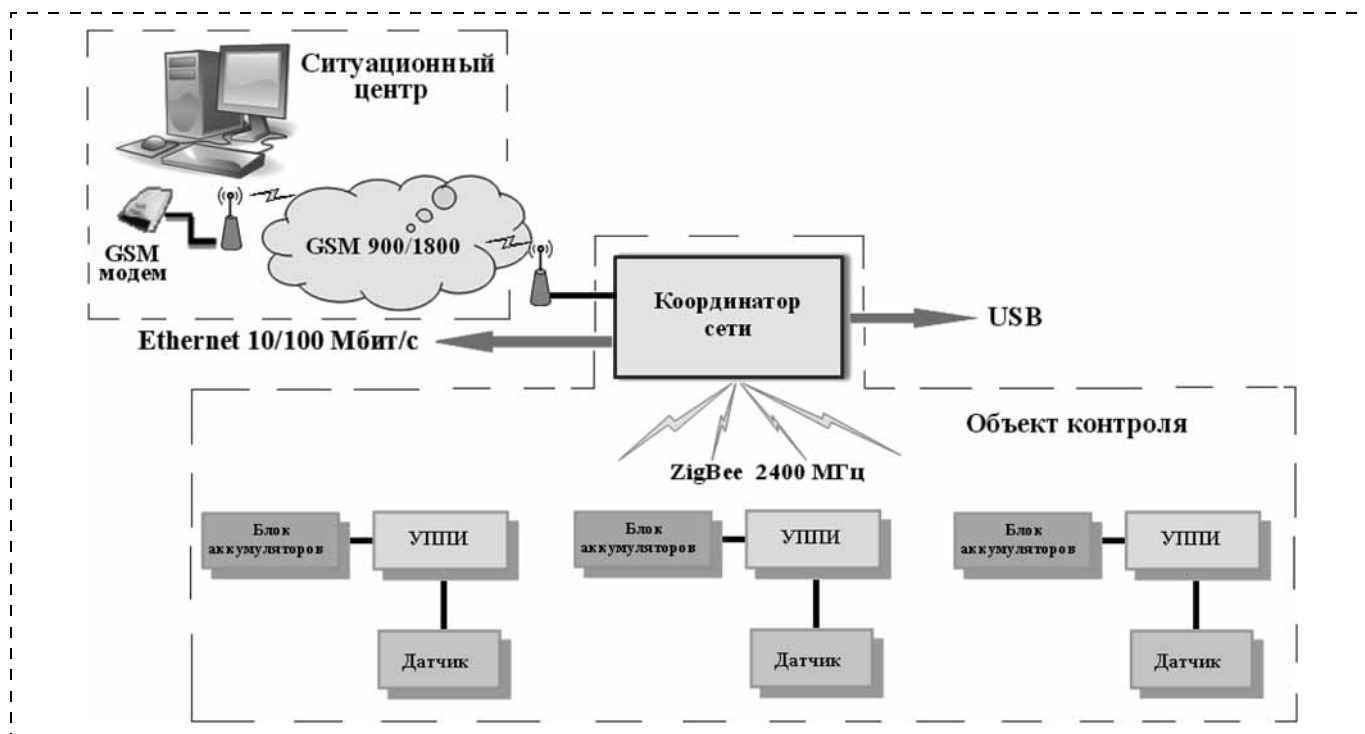


Рис. 1. Структура беспроводной сети мониторинга

Для организации беспроводной сети используют маломощные радиочастотные передатчики стандарта IEEE 802.15.4 не лицензируемого диапазона частот (2400...2483,5 МГц), входящие в состав датчиков и координатора [3]. Дальность связи между соседними датчиками определяется условиями распространения сигналов и может достигать до 50 м. Благодаря таким решениям достигается более высокая степень надежности по сравнению с проводными системами передачи данных, так как при проведении строительных работ крайне высока вероятность механических повреждений кабельных линий связи.

Отличительной особенностью данной системы является простота и скорость развертывания, высокая надежность и удобство использования. Датчики всех типов объединены в единую беспроводную сеть и позволяют контролировать объекты весьма большой протяженности за счет ретрансляции показаний одного датчика через другие. Выход из строя одного из датчиков не приводит к прекращению передачи и накоплению информации, так как сеть автоматически переконфигурируется и для прохождения информации от датчика на автоматизированное рабочее место (АРМ) выбираются другие маршруты передачи информации.

Главным компонентом беспроводной системы мониторинга является датчик. Причем датчики могут быть как аналоговыми, так и цифровыми. Датчик в совокупности с устройством преобразования и передачи информации (УППИ) и блоком аккумуляторов образуют сенсорный узел сети.

Важным аспектом работы сенсорного узла является минимизация потребления электроэнергии. В первую очередь, это достигнуто соответствующим выбором электронных компонентов с малым потреблением, а также способностью сенсорного узла переходить в режим "сна", что уменьшает потребление питания до минимума.

В целях мониторинга конструкционной безопасности зданий и сооружений могут быть применены различные типы датчиков [4]. Тип применяемого датчика зависит от условий работы конструкций и вида ее нагружения. Для оценки влияния окружающей среды используют датчики температуры и влажности. Если на конструкцию действуют длительные статические нагрузки, то для определения деформаций, напряжений и прогибов используют датчики сопротивления (тензодатчики) и датчики линейного и углового перемещения соответственно [5]. В том случае, если конструкция испытывает динамические нагрузки (ветер, землетрясение, работа механизмов), то традиционно используют акселерометры. Акселерометры позволяют оценить глобальное поведение конструкций, в то время как датчики деформации, датчики раскрытия трещин, датчики перемещения применяют для локального мониторинга.

Структурная схема датчика является идентичной по отношению к каждому из типов датчиков (рис. 2).

Первичные преобразователи датчиков температуры и влажности, а также акселерометров в данной статье не рассматриваются.

Наряду с традиционными ПП тензометрического и потенциометрического типа в рассматриваемой

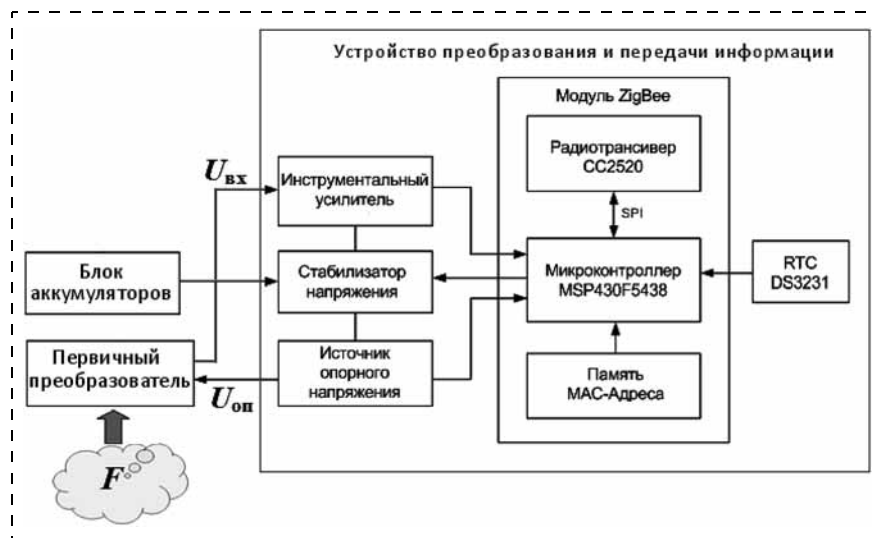


Рис. 2. Структурная схема датчика:

F — физическое или силовое воздействие на первичный преобразователь; RTC — часы реального времени

системе используется первичный преобразователь, основанный на методе измерения изменения взаимоиндукции дифференциально включенных катушек, изготовленных методом фотолитографии на печатных платах.

Общий вид индукционного ПП представлен на рис. 3.

Принцип действия индукционного ПП основан на том, что в перемещение, которое предполагается измерить, вовлекается излучающая катушка воздушного трансформатора, которая излучает электромагнитное поле синусоидальной формы с частотой до единиц мегагерц на две приемные катушки. В зависимости от положения излучающей катушки относительно приемных катушек в них наводится ЭДС. Значение наводимой ЭДС прямо пропорционально перемещению, а фаза наведенной ЭДС указывает направление перемещения. На рис. 4 представлена структурная схема индукционного ПП.

Достоинствами индукционных ПП являются:

- высокая точность измерений в большом диапазоне перемещений (± 20 мм) в широком диапа-

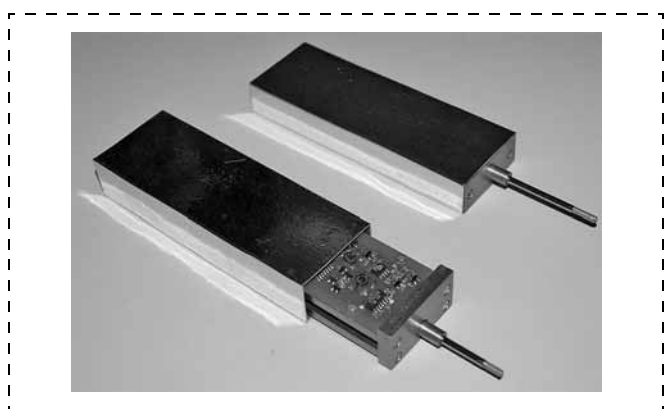


Рис. 3. Общий вид индукционного ПП

зоне температур от -40 до $+85$ °C;

- высокая разрешающая способность (10^{-3} мм);
- высокая линейность (0,1 %);
- среднее время наработки на отказ 10 000 ч;
- технологичность;
- практически не зависят от атмосферных условий.

Для примера на рис. 5 представлена номинальная статическая характеристика преобразования линейного перемещения (S , мм) в аналоговый выходной сигнал ($U_{\text{вых}}$, В) масштабного усилителя индукционного ПП.

Эти качества очень важны для систем конструкционной безопасности зданий и сооружений.

Существенным достоинством индукционного ПП на основе печатных катушек является использование при его производстве единой изготoвленного комплекта фотошаблонов, что обеспе-

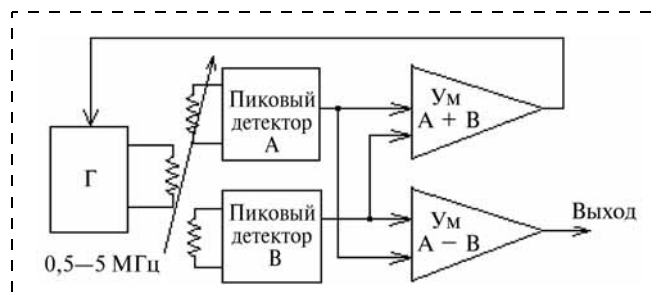


Рис. 4. Структурная схема индукционного ПП

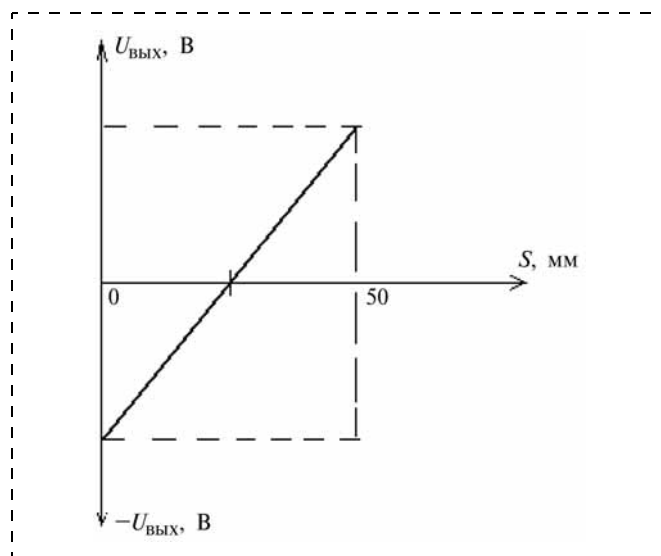


Рис. 5. Номинальная статическая характеристика индукционного ПП

чивает высокую повторяемость характеристик, снижает стоимость изделия, уменьшает вероятность брака.

Современная технология печатных плат позволяет изготавливать печатные катушки с высокой степенью точности — по третьему, четвертому классу точности и выше. В связи с этим, при необходимости получения более высокой точности преобразования требования к шагу и ширине проводников, а также к воздушному зазору между катушками могут быть и более жесткими. Обеспечиваемая точность изготовления печатных плат снимает основные проблемы, связанные с производством индукционных ПП перемещения, существовавшие ранее.

Достижения современной технологии в области фотолитографии и использование таких материалов, как ситал, керамика, полистирол, стекло для изготовления чувствительного элемента позволяют еще больше увеличить разрешающую способность ПП и перевести его в разряд микромеханических изделий.

Технические средства мониторинга конструкционной безопасности производства ОАО "Авангард" и специальное программное обеспечение по обработке данных прошли подконтрольную эксплуатацию на ряде жилых зданий, промышленных сооружений и объектах инфраструктуры:

- Здание Бизнес-центра, г. Санкт-Петербург, Синопская наб., 22;
- Здание музея "Юсуповский Дворец на Мойке", г. Санкт-Петербург, Наб. Мойки, 86;
- Здание жилого дома, г. Санкт-Петербург, Рижский пр., 34;

- Здание административное ВГИК им. С. А. Герасимова, г. Москва;
- Тоннель транспортной развязки — Балтийский тоннель, г. Москва;
- Тоннель метро ст. "Пролетарская" — ст. "Волгоградский пр.", г. Москва;
- Тоннель метро ст. "Сокол", г. Москва;
- Противооползневые сооружения на дублере Курортного пр., г. Сочи;
- Обделка автомобильного тоннеля на дублере Курортного пр., г. Сочи;
- ТРК "Июнь", г. Красноярск и др.

Список литературы

1. Горпинченко В. М., Егоров М. И. Мониторинг эксплуатационной пригодности особо ответственных, сложных и уникальных сооружений // Промышленное и гражданское строительство. 2004. № 10.
2. Баскаков С. Беспроводная система мониторинга строительных конструкций // Беспроводные технологии. 2010. № 3. С. 52—54.
3. IEEE Std 802.15.4-2006 Part 15.4: Wireless Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specification for Low-Rate Wireless Personal Area Networks (LR-WPANs).
4. Каляев И. А., Котов В. Н., Клиндухов В. Г., Кухаренко А. П. Микроэлектронные сенсорные системы: опыт создания и применения // Микросистемная техника. 1999. № 1. С. 32—35.
5. Каминский В. В., Васильев Л. Н., Дубровин П. В., Соловьев С. М., Шпейсман В. В. Датчики внутренних напряжений пластмассовых, композитных и бетонных конструкций на основе сульфида самария (SmS) // Микросистемная техника. 2001. № 10. С. 7—9.

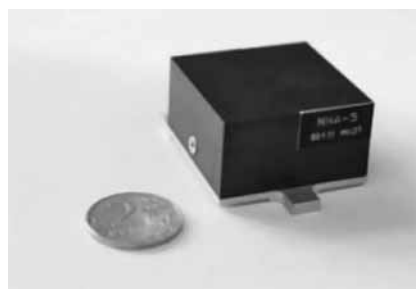
ОБРАЗЦЫ ИЗДЕЛИЙ, ИЗГОТОВЛЕННЫХ ПО НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКОЙ ПРОГРАММЕ СОЮЗНОГО ГОСУДАРСТВА "МИКРОСИСТЕМОТЕХНИКА"



Микроскопы для системы инерциальной навигации



Виброчастотные датчики силы



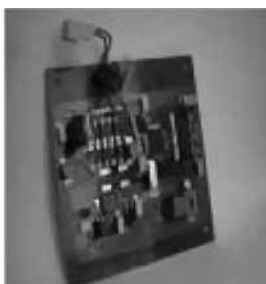
Акселерометры для систем инерциальной навигации



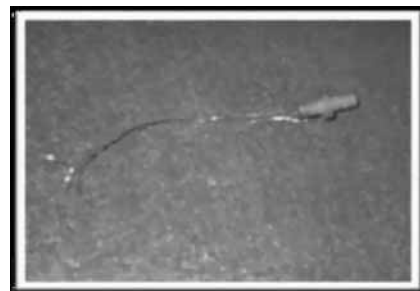
Датчики давления, вибрации, ускорения, силы, деформации



Датчики крутящего момента



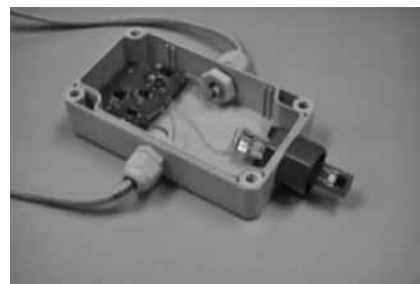
Датчики топливных сред



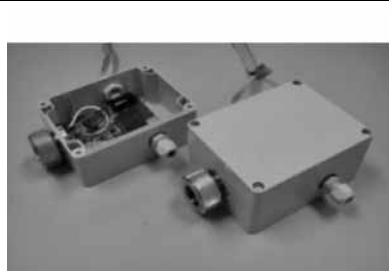
Датчики давления энергетических установок



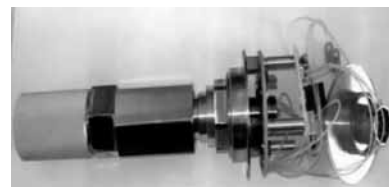
Миниатюрные датчики абсолютного давления для двигательных установок



Унифицированные датчики влажности для опасных объектов



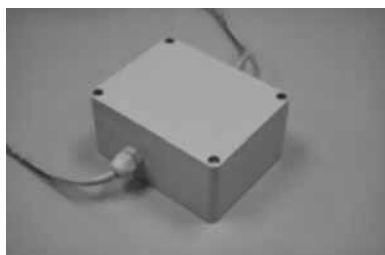
Датчики пороговых газоанализаторов на углеродные газы



Интеллектуальные пьезорезисторные датчики



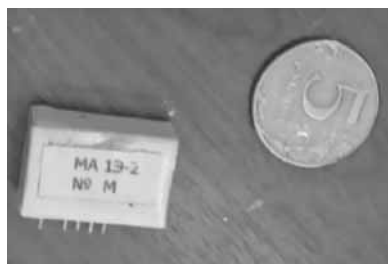
Датчики контроля газовоздушных смесей



Унифицированные датчики влажности



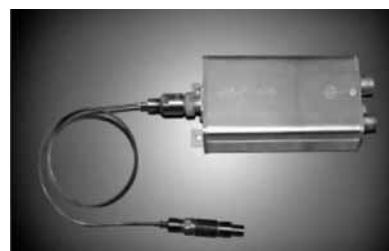
Малогобаритные датчики абсолютного давления



Акселерометры для системы инерциальной навигации



Датчики давления энергетических установок



Датчики давления систем аварийной защиты

Shubarev V. A., Metkin N. P., Vesnicheva M. V. *Scientific and Technical Program of the Union State of Russia and Belarus "Microsystem Technique" — the Basis of a New Generation of Microsystem Technique and Unified Integrated Dual-Use Systems on its Base* 2

We represent scientific and technical Program of the Union State of Russia and Belarus "Microsystem technique", its actuality, objectives and targets. In this work we examine scientific, technological, political, socioeconomic and business aspects of the Program.

Keywords: scientific and technical Program of the Union State of Russia and Belarus, "Microsystem technique", microsystem technique device, special processing and calibration equipment, radio electronics component base

Avakaw S. M., Aheichanka A. S., Zouev V. P., Karneliuk A. I., Matsiushkou U. E., Samokhvalov V. K., Tachitski J. I., Trapashka H. A., Baryshnikov D. P., Rusetsky V. A. *Special Opto-Mechanical, Inspection and Measurement Equipment for Industrial Production of Microsystem Engineering Products* 7

The paper presents preliminary results of the implementation of the scientific and technical program of the Union State "Development and manufacture of a new generation of microengineering systems, as well as consistent integrated systems of dual-purpose based on them" in order to create the special opto-mechanical, inspection and measurement equipment for conducting photolithographic and inspection processes in the manufacture of the microsystem engineering products.

Keywords: microsystem engineering, patterning, pattern generator, stepper, alignment of patterns, critical dimension, inspection of flatness

Barbarchuk D. V., Klim O. V., Mazovka T. E., Kovalchuk G. F., Kavenski A. E., Tsaruk A. V., Tsirkun D. P., Shkolyk S. B., Baryshnikov D. P., Shubarev V. A. *Equipment for Assembly of Microsystem Engineering Devices* 15

The paper considers design principles of systems for grinding and honing thinning, double-threaded separation, laser processing, diffusion wafer welding and "flip-chip" die bonding in assembly of micro-system engineering devices. The results of research and development are shown.

Keywords: micro-system engineering, abrasive tools, semiconductor wafer grinding, wafer split-up in the crystals, laser hole formation, diffusion welding, die bonding, "flip-chip"

Michailov A. N., Berlik S. A., Michailov E. A. *The Methodology of Automated Control of Parameters of Microsystems Sensors* 22

The article is about questions of automation of development of test programs and their application for control of parameters of sensors of microsystem engineering on the basis of behavioral models, the components which are a part of sensors are considered. Behavioral models a components represent the texts of program modules written in higher-level language of the description of equipment (Hardware Description Language — HDL). In article it is supposed to use as descriptions a compinents — the Verilog HDL language.

Keywords: control of parameters, sensor, behavioral models, test program

Galisultanov A. T., Dzyubanenko S. V., Ignatuev V. S., Silakov D. M., Kalinin V. A. *Acoustoelectronic Force Sensor in Security Systems for Hydroelectric Generator in Hydroelectricity* 24

Acoustoelectronic force sensor for force control on the anchor piles and stud fastening covers of hydroelectric turbines is developed. The use of piezoelectric sensors can improve the accuracy and performance. The SKDS-SISH monitoring system built on these sensors allows continuous monitoring of load, which increases the safety of complex technical objects.

Keywords: acoustoelectronics, SAW resonator, force sensors, hydroelectricity

Taratyn I. A., Serdyuk I. V., Smirnov M. S., Grinchuk A. P. *Fire Alarm Detectors on the Base of Low Energy-Consuming Gas Sensors for Early Prevention of Inflammability* 28

The article describes fire alarm detector on the base of gas sensor, manufactured by batch microelectronic technology. The working principle of semiconductor sensor is described. Test results of the detectors in the gas analytic system at "Avangard".

Keywords: gas sensing module, aluminum oxide, gas mixing station, gas analytic system, explosion-proof

Timoshenkov S. P., Kalugin V. V., Kochurina E. S., Anchutin S. A., Kalinin V. A., Stroganov K. A. *Various Ranges of Linear Accelerations Microaccelerometers for Using in the Inertial Navigation Systems* 32
 Micromechanical accelerometers have a wide range of application. Development of a capacitive-type accelerometer is described. High sensitivity, simple design and manufacturing technology are the major advantages of these devices.

Keywords: microaccelerometer, MEMS, capacitive accelerometer sensor

Pinaev V. V., Sukhanov V. S., Pankov V. V., Mikhailov Yu. A., Danilova N. L., Bylinkin S. F., Gavrilov A. A., Shipunov A. N. *Integral Mems-Transducers with High Stability of Output Parameters* 36
 There are some production procedures securing the increase of timing stability of pressure transducers and accelerometers parameters. Results of high-speed reliability tests of samples are presented. Reliability parameters of the transducers are determined by an experiment-calculated method.

Keywords: pressure transducer, accelerometer, sensor, timing stability of parameters, reliability tests

Gonchar I. I., Kisilev L. N., Michailov A.N., Pevgov V. G., Semenov A. V., Shubarev V. A. *Thermoresistive Cryogenic Medium Level Measurement Sensors* 41
 Presented research results of thermoresistive cryogenic medium level measurement sensors, which are made on thin heat-insulating substrates using microelectronic technology.

Keywords: thermistor, sensor, level sensor, level gauge, delay time, sensitivity

Bubnov Yu. Z., Vishnevnik L. N., Serdyuk I. V., Smirnov M. S. *Semiconductor Gas Sensors with Membrane Structure for Fire Alarm Detector*. 45
 The demand within the market of modern combined fire alarm detectors, which includes gas sensor module is defined. For this module is proposed semiconductor sensor, which includes membrane structure. The test results of semiconductor sensor with membrane structure are presented.

Keywords: fire detector, fire alarm detectors, semiconductor sensor

Michaylov A. N., Kosinskiy V. N. *Building and Facility Strain Gages and Construction Safety Monitoring System* 50
 Wireless monitoring systems application reasonability in the area of building and facilities construction safety support is shown. Engineered by the public corporation "Avangard" specialists wireless deformation monitoring system presented in this article. Shown the technology which provides rise of building and facilities complex safety through increasing self-descriptiveness and reliability of deformation monitoring system as one of the elements of complex safety. The structure of the new inductive sensing device for the deformation sensor of wireless deformation monitoring system, which is developing in the network of Union state program "Microsystemtechnics", observed in this article.

Keywords: construction monitoring system, sensors, inductive sensing device, software

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://novtex.ru/nmst/>

Адрес редакции журнала: 107076, Москва, Стромынский пер., 4. Телефон редакции журнала (499) 269-5510. E-mail: nmst@novtex.ru
 Журнал зарегистрирован в Федеральной службе по надзору за соблюдением законодательства
 в сфере массовых коммуникаций и охране культурного наследия.
 Свидетельство о регистрации ПИ № 77-18289 от 06.09.04.

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

Сдано в набор 18.06.2012. Подписано в печать 23.07.2012. Формат 60×88 1/8. Заказ МС812.

Цена договорная

Оригинал-макет ООО «Авансд солюшнз».

Отпечатано в ООО «Авансд солюшнз». 105120, г. Москва, ул. Нижняя Сыромятническая, д. 5/7, стр. 2, офис 2.