TAIO- & MIKPOCICIEMIAA

Том 18. № 7 🔶 2016

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, в систему Российского индекса научного цитирования и реферируется в базе данных INSPEC и базе данных RSCI на платформе Web of Science

Главный редактор

Мальцев П. П., д.т.н., проф.

Зам. гл. редактора

Лучинин В. В., д.т.н., проф. Шур М., д.ф.-м.н., проф. (США)

Редакционный совет:

Аристов В. В., д.ф.-м.н., проф., чл.-кор. РАН Асеев А. Л., д.ф.-м.н., проф., акад. РАН Гапонов С. В., д.ф.-м.н., проф., акад. РАН Каляев И. А., д.т.н., проф., чл.-кор. РАН Квардаков В. В., д.ф.-м.н., проф., чл.-кор. РАН Климов Д. М., д.т.н., проф., акад. РАН Ковальчук М. В., д.ф.-м.н., проф., чл.-кор. РАН Нарайкин О. С., д.т.н., проф., чл.-кор. РАН Никитов С. А., д.ф.-м.н., проф., чл.-кор. РАН Рыжий В. И., д.ф.-м.н., проф., чл.-кор. РАН (Япония) Сауров А. Н., д.т.н., проф., чл.-кор. РАН Сигов А. С., д.ф.-м.н., проф., акад. РАН Чаплыгин Ю. А., д.т.н., проф., чл.-кор. РАН Шевченко В. Я., д.х.н., проф., акад. РАН Редакционная коллегия: Абрамов И. И., д.ф.-м.н., проф. (Беларусь) Агеев О. А., д.т.н., проф. Андреев А., к.ф.-м.н., (Великобритания) Андриевский Р. А., д.х.н., проф. Антонов Б. И. Астахов М. В., д.х.н., проф. Быков В. А., д.т.н., проф. Горнев Е. С., д.т.н., проф. Градецкий В. Г., д.т.н., проф. Кальнов В. А., к.т.н. Карякин А. А., д.х.н., проф. Колобов Ю. Р., д.т.н., проф. Кузин А. Ю., д.т.н., проф. Панич А. Е., д.т.н., проф. Петросянц К. О., д.т.н., проф. Петрунин В. Ф., д.ф.-м.н., проф. Пожела К., д.ф.-м.н. (Литва) Путилов А. В., д.т.н., проф. Телец В. А., д.т.н., проф. Тимошенков С. П., д.т.н., проф. Тодуа П. А., д.т.н., проф. Шубарев В. А., д.т.н., проф. Отв. секретарь Лысенко А. В. Релакция: Григорин-Рябова Е. В. Чугунова А. В. Учпелитель: Издательство "Новые технологии"

СОДЕРЖАНИЕ _____

Издается с 1999 г.

ОБЩИЕ ВОПРОСЫ

МОДЕЛИРОВАНИЕ И КОНСТРУИРОВАНИЕ МНСТ

элементы мнст

МАТЕРИАЛОВЕДЧЕСКИЕ И ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ МНСТ

Научный редактор выпуска: д-р техн. наук, проф. В. А. Гридчин Ответственный за выпуск: д-р хим. наук, проф. В. Ю. Васильев

Аннотации на русском и английском языках с 1999 г. по настоящее время находятся в свободном доступе на сайте журнала (http://microsystems.ru; http://novtex.ru/nmst/) и научной электронной библиотеки (http://elibrary.ru). Электронные версии полнотекстовых статей расположены на сайте журнала: с 1999 по 2014 г. в разделе "АРХИВ".

ПОДПИСКА:

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

© Издательство "Новые технологии", "Нано- и микросистемная техника", 2016

INTERDISCIPLINARY, SCIENTIFIC, TECHNIQUE AND PRODUCTION JOURNAL

Journal of NANOand MICROSYSTEM TECHNIQUE NANO- I MIKROSISTEMNAYA TEHNIKA

ISSN 1813-8586

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

Editorial council:

Aristov V. V., Dr. Sci. (Phys.-Math.), Prof., Cor.-Mem. RAS Aseev A. L., Dr. Sci. (Phys.-Math.), Prof., Acad. RAS Chaplygin Ju. A., Dr. Sci. (Tech.), Prof., Cor.-Mem. RAS Gaponov S. V., Dr. Sci. (Phys.-Math.), Prof., Cor.-Mem. RAS Kaljaev I. A., Dr. Sci. (Tech.), Prof., Cor.-Mem. RAS Klimov D. M., Dr. Sci. (Tech.), Prof., Acad. RAS Kovalchuk M. V., Dr. Sci. (Phys.-Math.), Prof., Cor.-Mem. RAS Kvardakov V. V., Dr. Sci. (Phys.-Math.), Prof., Cor.-Mem. RAS Narajkin O. S., Dr. Sci. (Phys.-Math.), Prof., Cor.-Mem. RAS Nikitov S. A., Dr. Sci. (Phys.-Math.), Prof., Cor.-Mem. RAS Ryzhii V. I. (Japan), Dr. Sci. (Phys.-Math.), Prof., Cor.-Mem. RAS Saurov A. N., Dr. Sci. (Tech.), Prof., Cor.-Mem. RAS Shevchenko V. Ya., Dr. Sci. (Chem.), Prof., Acad. RAS Sigov A. S., Dr. Sci. (Phys.-Math.), Prof., Acad. RAS **Editorial board:** Abramov I. I. (Belorussia), Dr. Sci. (Phys.-Math.), Prof. Ageev O. A., Dr. Sci. (Tech.), Prof. Andreev A. (UK), Cand. Sci. (Phys.-Math.), Prof. Andrievskii R. A., Dr. Sci. (Chem.), Prof. Antonov B. I. Astahov M. V., Dr. Sci. (Chem.), Prof. Bykov V. A., Dr. Sci. (Tech.), Prof. Gornev E. S., Dr. Sci. (Tech.), Prof. Gradetskiy V. G., Dr. Sci. (Tech.), Prof. Kalnov V. A., Cand. Sci. (Tech.) Karjakin A. A., Dr. Sci. (Chem.), Prof. Kolobov Ju. R., Dr. Sci. (Tech.), Prof. Kuzin A. U., Dr. Sci. (Tech.), Prof. Panich A. E., Dr. Sci. (Tech.), Prof. Petrosjants C. O., Dr. Sci. (Tech.), Prof. Petrunin V. F., Dr. Sci. (Phys.-Math.), Prof. Pozhela K.(Lithuania), Dr. Sci. (Phys.-Math.) Putilov A. V., Dr. Sci. (Tech.), Prof. Shubarev V. A., Dr. Sci. (Tech.), Prof. Telets V. A., Dr. Sci. (Tech.), Prof. Timoshenkov S. P., Dr. Sci. (Tech.), Prof. Todua P. A., Dr. Sci. (Tech.), Prof.

Executive secretary:

Lysenko A. V.

Editorial staff:

Chugunova A. V. Grigorin-Ryabova E. V.

Our:

Web: www.microsistems.ru/eng; e-mail: nmst@novtex.ru

To subscribe, please contact with:

JSC "MK-Periodica": Tel: +7 (495) 672-7012 Fax: +7 (495) 306-3757 E-mail: import@periodicals.ru The Journal is included in the list of the Higher Attestation Commission of the Russian Federation, in the Russian system of science citation index, INSPEC data base and RSCI data base

Published since November 1999

CONTENTS

Vol. 18

No. 7

2016

GENERAL QUESTIONS

Vasilyev V. Yu. Trends in Development of the Technologies and Production of the Micro System Components 410

DESIGNING AND MODELLING OF MNST

Harvester in Consideration of Fringing Field Effects 429

MICRO- AND NANOSYSTEM TECHNIQUE ELEMENTS

Lobach O. V. Wireless System for the Thermal Losses' Monitoring based on MEMS of a Thermal Flow Sensor 444

SCIENCE OF MATERIALS AND TECHNOLOGICAL BASICS OF MNST

Vasilyev V. Yu. Ultra-Thin Metal Films of the Platinum Group for Application in Nano- and Micro-Technologies 461

Science editor of issue: D. Sc., Professor V. A. Gridchin Chief of issue: D. Sc., Professor V. Yu. Vasiliev

Общие вопросы General Question

УДК 641.3.049

В. Ю. Васильев, д-р хим. наук, проф.,

Новосибирский государственный технический университет, заместитель Генерального директора, ООО "СибИС", г. Новосибирск

ТРЕНДЫ РАЗВИТИЯ ТЕХНОЛОГИЙ И ПРОИЗВОДСТВА КОМПОНЕНТОВ И УЗЛОВ МИКРОСИСТЕМНОЙ ТЕХНИКИ

Поступила в редакцию 04.04.2016 г.

Выполнен обзор современных трендов развития технологий и организации разработок и производства компонентов микросистемной техники (MCT). Проанализированы состояние и основные факторы развития, приведены основные разработчики и производители компонентов MCT. Рассмотрены особенности взаимоотношений компаний-разработчиков и компаний-изготовителей, которые необходимо принимать во внимание для быстрого прототипирования и производства продуктов MCT. Показаны некоторые перспективные направления развития будущих исследований и разработок MCT.

Ключевые слова: технологии микросистемной техники, МСТ, тренды развития, взаимоотношения разработчик изготовитель

Введение

Современное развитие прецизионных технологий за рубежом определяется потребностями рынка продуктов высоких технологий (*Market-driven technology*), целенаправленно формируемым крупнейшими рыночными игроками. Примером серьезности такого подхода развития на десятилетия вперед может служить наличие в штате компании Сisco — производителя коммуникационной аппаратуры США должности официального футуролога, с результатами деятельности которого можно ознакомиться на сайте компании (см., например [1]).

Важнейшими конкурентными преимуществами продуктов высоких технологий являются скорость их вывода на рынок и цены, определяемые себестоимостью и массовостью производства. Технологии микросистемной техники (далее МСТ) являются важнейшей составляющей современных высоких технологий, но исторически развиваются несколько позже технологий интегральных микросхем (ИМС). С помощью технологий МСТ разработаны сенсоры давления, инжекторы, акселерометры, гироскопы, газовые сенсоры, микродисплеи, биохимические сенсоры, сенсоры скорости, микрореле, осцилляторы и многое другое. Основным преимуществом компонентов на основе технологий МСТ являются их малые размеры, массовость, высокая повторяемость характеристик и надежность. (Термин "компоненты" используется согласно классификации [2] и характеризует "изделия, изготовленные на одном кристалле методами микроэлектронной технологии и содержащие от 1 до 1000 механических элементов"). Состояние и перспективы технологий МСТ на начало столетия рассмотрены в ряде отечественных работ [3—6]. Опубликовано более 30 зарубежных монографий по технологиям и устройствам МСТ.

Важнейшие события развития технологий МСТ в течение последних 40 лет включали:

 научно-техническое обоснование основного конструкционного материала для технологий МСТ
 монокристаллического кремния [7];

— разработку технологических процессов формирования прецизионных трехмерных структур жидкостным и плазменным травлением, разработку процессов формирования и удаления "жертвенных слоев" для формирования одно- или двузащемленных многослойных балочных ("подвешенных") элементов структур [8];

— разработку технологий соединения подложек кремния (*wafer bonding*) [9];

— разработку маршрутов изготовления и освоения производства сначала индивидуальных компонентов МСТ (сенсоров давления), а затем большой номенклатуры узлов МСТ, в том числе интегрированных с ИМС либо непосредственно в кремниевой подложке [10], либо в виде отдельных компонентов кристаллов в специализированных корпусах [11]; – разработку номенклатуры корпусов и технологий корпусирования, измерений и испытаний компонентов и узлов MCT;

— решение метрологических вопросов. Термин "узлы" использован согласно классификации [2] и характеризует "изделия, состоящие на 100 % из компонентов микросистемной техники". В последние годы технологии МСТ развиваются в трендах самых современных технологий сборки миниатюрных многофункциональных устройств, известных как трехмерная сборка на уровне пластин (*Wafer Level Packaging*, WLP) и этажерочная сборка с использованием технологий межсоединений через сквозные отверстия в кремнии (*Through Silicon Vias*, TSV) [11].

Крупнейшие зарубежные аналитические компании, работающие в области электронных технологий (Yole Developpement [12], MarketsandMarkets [13], BCC Research [14], IHS Technology [15]) дают на ближайшие годы прогнозы стабильно высокого (на уровне выше 10 %) прироста ежегодного производства уже известных и довольно широких по номенклатуре компонентов и узлов МСТ. Отечественные обзоры по этой тематике представлены, например, в работах [16, 17]. Анализ обширной литературы указывает на ожидания, всесторонний анализ и подготовку возможности взрывного развития этих технологий и роста производства на десятилетия вперед [17]. Движущими силами такого роста рассматриваются массовые продукты высоких технологий, объединенные идеей построения сетевых систем на основе сети Интернет [1].

Очевидно, что подобные прогнозы роста ставят задачи как организации массового производства огромного количества разнообразных уже известных компонентов и узлов технологий МСТ, так и разработки и освоения в производстве новых, только появляющихся типов устройств. В данной работе кратко рассматриваются некоторые основные тренды и проблемы организации исследований, разработок и производства компонентов и узлов (далее КУ) технологий МСТ на базе кремниевых подложек.

Состояние и основные факторы развития технологий КУ МСТ

Этапы развития технологий МСТ характеризовались по-разному [18, 19]. В работе [18] выделены несколько десятилетних этапов. На первом (с середины 1950-х до начала 1960-х годов) проводились исследования, направленные на создание основ будущей технологии. В этих работах участвовали научные подразделения таких крупных компаний, как *Bell Telephone Laboratories*, а также некоторые академические учреждения. Главное внимание уделялось актуальным в то время технологиям двойного назначения и, прежде всего, созданию различных точных датчиков. При этом тре-

бовалась только высокая надежность изделий, а их высокая стоимость не являлась определяющей. Второй этап развития технологии МСТ (1960-е годы) определялся такими мощными военно-промышленными компаниями США, как Fairchild, Westinghouse, Honeywell, которые спешили коммерциализировать первые экспериментальные наработки. В это время появился первый сенсор давления, изготовленный по технологии МСТ. В 1967 г. появилась необходимость использования "жертвенных слоев" для отделения микромеханических элементов компонентов от кремниевой подложки. И только когда стали ясны перспективы нового направления, к началу 1970-х годов, в академической науке на него стали выделять целевое финансирование для решения задач сокращения стоимости и расширения областей применения КУ МСТ. На третьем этапе (1970-е годы) появился первый акселерометр и первые струйные сопла, разработана промышленная технология объемного жидкостного травления кремния для формирования элементов МСТ: мембран, балок и т.д. В восьмидесятые годы XX столетия активно проводилась разработка технологий, необходимых для производства КУ МСТ. В это время появилась первая системная публикация [7], обосновывающая применение кремния не только в качестве полупроводникового, но и конструкционного механического материала. Был разработан технологический маршрут LIGA (комбинация литографии, гальванопластики и пресс-формовки для создания высокоаспектных микроструктур — структур с большим соотношением высоты и ширины). Девяностые годы XX-го столетия ознаменовались интенсивной разработкой технологий КУ МСТ (патентование глубокого реактивного ионного травления), началом продаж первого акселерометра ADXL50 компании Analog Devices, появлением и развитием био- и оптоэлектронных компонентов МСТ. В начале 90-х годов XX века калифорнийская компания Microelectronic Center of North California получила поддержку агентства DARPA (Defence Advances Research Project Agency) на разработку пользовательской технологии Multi-User MEMS Process. Далее наступила микромеханическая эпоха, которая продолжается и в настоящее время. Особенностью этого этапа является, по мнению автора, развитие беспроводных устройств МСТ.

В эволюционном развитии изделий на основе технологий МСТ автор [19] выделил четыре "прорывных" события. Первым событием (в 1990-е годы), охарактеризованным как "Уровень процессов", явился международный успех компании *Sensonor* с датчиком воздушных подушек безопасности для автомобилей — прибором SA20. В мире было продано около 35 млн штук таких сенсоров, что позволило компании занять 60—70 % рынка датчиков в Европе. Вторым событием (2000-е годы, охарактеризованным как "Уровень МСТ", в ориги-

нале — "MEMS level") автор посчитал продолжение развития КУ МСТ применительно к автомобильным инерционным системам и успех компании Texas Instruments в области цифровых микрозеркальных устройств. Третьим событием (2010-е годы, "Уровень сборки/корпусирования") явилось интенсивное развитие сборочных технологий, которые стали важнейшими в производстве КУ МСТ. В частности, появились первые изделия, корпусированные с использованием технологии TSV. Событием ближайшего будущего (2020-е годы, "Системный уровень") автор [19] посчитал постепенное исчезновение устройств, включающих МСТ-ИМС на одном кристалле в пользу интенсивного развития 3D-интеграции кристаллов различных компонентов МСТ.

Исторически развитие конкретных типов изделий на основе технологий МСТ происходило по правилу "один тип изделия—один процесс—один тип корпуса—один тип ИМС—один тип тестовой системы". Различные КУ МСТ находятся на различных этапах своих жизненных циклов, которые обычно представляются в виде S-образной кривой (рис. 1). На кривой выделяют следующие фазы: появление (*Emerging*), развитие (*Development*), зрелость (*Mature*) и закат (*Decline*). Из перечисленных выше КУ МСТ наиболее близкими к началу фазы "Закат" находятся головки струйных принтеров.

Длительность подготовки изделий МСТ к производству исторически была непредсказуемой. В работе [21] были обобщены данные о времени выхода на рынок сенсоров давления, акселерометров, газовых сенсоров, клапанов, инжекторов, дисплеев, биохимических сенсоров, радиочастотных КУ МСТ, сенсоров скорости, микрореле, осцилляторов. Автор установил, что для указанных КУ МСТ усредненное время коммерциализации составляло около 30 лет. В этом интервале среднее время исследований (НИР) составляло около 10 лет, время эволюции устройств — около 8 лет, время работ по снижению цены до приемлемой (*Cost reduction*) около 12 лет.

Развитие технологии позволило существенно сократить разработку вновь появляющихся КУ МСТ, что показывает рис. 2 (см. третью сторону обложки) [22]. Время от НИОКР до выпуска рыночных продуктов сократилось с 21 года у сенсоров давления до 11 лет для осцилляторов. Тем не менее, время этапа *Cost reduction* остается достаточно большим.

В фазе "Зрелость" КУ МСТ выпускают серийно по отработанным технологическим процессам. Их совершенствование идет по пути улучшения экономических показателей производства. Например, тренд изменения размеров основных массовых КУ МСТ за последние 7 лет указывает на почти двукратное уменьшение их площади [22]. Фактически это означает возможность удвоения объемов производства (рис. 3).



Рис. 1. Фазы эволюции во времени и некоторые примеры КУ МСТ по группам [20]: группа 1 — микротопливные ячейки, генераторы энергии, спикеры, осцилляторы; группа 2 — микрофоны, микроболометры, компасы, микродисплеи, автофокус; группа 3 — головки принтеров, фильтры, сенсоры давления, акселерометры, гироскопы

Fig. 1. Evolution phases in time and some examples CU MST on groups [20]: 1 - microfuel cells, energy generators, speakers, oscillators; group 2 - microphones, the micro bolometer, compasses, micro displays, an auto focus; group 3 - heads of printers, filters, pressure sensors, accelerometers, gyroscopes



Рис. 3. Тренды изменений размеров кремниевых кристаллов КУ МСТ (по данным [22]). Примечание: ИИУ — инерциальные измерительные устройства

Fig. 3. Trends of changes of the sizes of silicon crystals CU MST (on data [22]). The note: UHY – inertial measuring devices

Общим трендом для КУ МСТ в фазе "Зрелость" является объединение различных устройств, например, благодаря трехмерной сборке. Кроме того, повышается функциональность КУ МСТ. Например, дорожная карта развития сенсоров для мобильных приложений компания *Yole Developpement* [23] прогнозирует в качестве генерального направления развития расширение и дополнение функций КУ МСТ от детектирования и измерений (что осуществляется в современных сенсорах) к функциям интерпретирования данных для решения задач ситуационной осведомленности потребителей.

В силу чисто экономических причин наиболее интересными и перспективными представляются КУ МСТ, отнесенные к фазе жизненного цикла

"Появление". Однако КУ этой фазы развития чаще всего имеют весьма условный технологический маршрут, который должен быть доработан для передачи в производство. Разработка новых изделий для групп КУ МСТ, находящихся в фазе "Зрелость", нецелесообразна без какого-либо радикального улучшения потребительских характеристик, затребованных рынком. Например, такими характеристиками можно считать расширение температурного диапазона кремниевых МСТ сенсоров давления в область повышенных температур. И если для коммерческих применений это экономически нецелесообразно, то для сенсоров специального назначения это представляет большой интерес. В этом случае разработка таких сенсоров потребует новых технологических решений и, таким образом, может быть отнесена к фазе "Появление".

Развитие концепций, связанных с сетевыми системами на основе Интернета [1], существенным образом усложняет проблемы производства КУ МСТ. В литературе обсуждаются различные термины таких систем: "Всеобщий Интернет" ("Internet of Everything, IoE"), "Интернет вещей" ("Internet of Things, IoT") и другие. Кратко суть этих концепций состоит в организации гигантских сетевых систем многофункционального назначения, состоящих из различных уровней, подуровней, сенсорных систем и подсистем, в том числе с накоплением, предварительной обработкой и передачей данных с использованием "облачных" решений, систем хранения данных, специального программного обеспечения. При этом важным является отсутствие изначально фиксированных границ построения таких систем, предполагающее возможность их развития и расширения.

Реальными обсуждаемыми примерами таких концепций могут служить идеи "Умный город", "Умный дом", "Носимая электроника", а также современная мобильная связь. Подобные алгоритмы построения сетевых систем применяют и для военных и оборонных задач. Например, беспилотные летательные аппараты, автономные подводные аппараты, мини- и микроспутники рассматриваются как компоненты всесредной (море, суша, атмосфера, ближний космос) современной сетецентрической системы военных роботизированных средств (*Network-Centric Warfare*) [24].

Основой всех типов перспективных сетевых систем являются разнообразные сенсоры, прежде всего КУ, изготовленные на базе технологий МСТ на кремниевых подложках. Прогнозируется, что число КУ МСТ в перспективных смартфонах возрастет от 14 в настоящее время до 20 штук к концу 2018 года (причем более сложных, интегрированных КУ МСТ) [23]. Прирост потребления КУ МСТ для изделий носимой электроники в наручном исполнении прогнозируется в 2015—2020 гг. с 50 до 250 млн штук [25]. Наиболее амбициозные прогнозы роста рынков изделий технологий МСТ [17, 21] основывались, в том числе, на предполагаемом увеличении числа КУ МСТ в расчете на одного потребителя до 1000 штук.

Основные производители изделий МСТ

Эволюционное развитие КУ МСТ и переход для некоторых из них к массовому производству радикально меняют обстановку на рынке. Компанииизготовители КУ МСТ вынуждены искать лучшие способы ускорения освоения дешевого крупномасштабного производства с использованием всех возможностей для достижения успеха. Необходимость снижения стоимости заставляет изготовителей уменьшать размеры КУ МСТ и повышать степень интеграции за счет использования технологий WLP и TSV. В тройку крупнейших игроков рынка КУ МСТ входят компании Texas Instruments, STMicroelectronics, Robert Bosh с ежегодным объемом производства для каждого в 0,8-1 млрд долларов для собственных приборов. Эти предприятия относятся к типу так называемых "вертикальноинтегрированных компаний", выполняющих все типы работ: от разработки до серийного выпуска.

Однако практически все новые типы КУ МСТ разрабатывают предприятия, работающие по модели Fabless. Такие предприятия не имеют собственного производства КУ МСТ и занимаются разработкой, исследованиями, измерениями, испытаниями, решением метрологических вопросов, разработкой технологий корпусирования КУ МСТ, стандартизацией и т.д. Fabless-предприятия вынуждены искать возможности реализации своих уникальных КУ МСТ на предприятиях, обладающих соответствующими технологиями. Например, это могут быть небольшие компании с необходимым комплектом технологического оборудования. Однако массовое изготовление КУ МСТ разработки Fabless-компаний возможно только в условиях крупных производителей.

Такими крупными серийными производителями являются кремниевые фабрики (WaferFab), работающие по бизнес-модели Foundry (только производство). Первоначально Foundry строили для производства субмикронных ИМС различных типов. Они имели мощности для запуска нескольких десятков тысяч кремниевых пластин диаметром 200 мм в месяц. После выработки ресурса комплекта технологического оборудования его заменяли на более современное для освоения следующего поколения ИМС. Однако переориентация имеюшегося производства на освоение технологий КУ МСТ дает отличную альтернативу. Очевидный выигрыш для фабрик здесь в существенно более низких требованиях к технологиям изготовления КУ МСТ, чем к ИМС. Это дает возможность напрямую применять весь накопленный опыт и продлять сроки эксплуатации технологического оборудования. В итоге такие предприятия имеют меньшую себестоимость производства, стабильный и более высокий выход годных изделий, обеспечивают меньшее время вывода продукции на рынок за счет снижения времени передачи технологий и быстрого перехода к этапу производства. Переориентация *Foundry*, ранее производящих субмикронные ИМС, на производство изделий МСТ является трендом последних лет. Например, такими предприятиями являются известные полупроводниковые компании *Taiwan Semiconductor Manufacturing Company (TSMC)* и *Global Foundries*, показавшие в 2011 г. прирост производства КУ МСТ около 200 и 178 %, соответственно.

Возможность кооперации компаний, работающих по бизнес-моделям Fabless и Foundry, дает альтернативу традиционному медленному пути освоения КУ МСТ. Этот путь состоит в освоении технологии на лабораторном оборудовании с дальнейшим переносом спроектированных изделий на производственные предприятия. При этом имеет место принципиальное отличие взаимоотношений разработчиков и производителей ИМС и КУ МСТ с Foundry. Развитие ИМС в мире определяется дорожной картой развития микроэлектронных технологий (International Technology Roadmap for Semiconductors, ITRS) [26]. ITRS дает общие направления развития микроэлектроники для всех участников этого бизнеса в глобальном масштабе. Одним из следствий ITRS являются появление в значительной степени унифицированных проектно-технологических норм и технологических маршрутов (например — КМОП) производства ИМС одного и того же типа на всех Foundry-предприятиях в мире. Взаимоотношения Fabless-компаний и ИМС Foundry в этом случае происходит согласно так называемому Process Design Kit (PDK). Эти документы количественно характеризуют производственные технологические маршруты (например, КМОП 0,18 мкм). Foundry обеспечивают изготовление экспериментальных образцов в рамках программ типа Shuttle Service или MPW (Multi Project Wafer). При этом гарантируется качество технологии изготовления, в том числе представлением объективных данных о результатах замеров технологических параметров.

Для случая КУ МСТ ситуация принципиально отличается отсутствием в настоящее время каких-либо обобщающих дорожных карт, стандартов и многообразием КУ МСТ, каждое из которых реализуется по своему технологическому маршруту. При этом технологию изготовления КУ МСТ разрабатывают на предприятии-изготовителе КУ МСТ индивидуально "под заказчика", т. е. для определенной *Fabless*-компании. Это является основой для кооперации при производстве КУ МСТ.

Исторически взаимодействие разработчика КУ (фактически — владельца конструкции изделия) и производителя изделия (как правило, разработчика и владельца технологии) всегда вызывали массу сложностей. Проблемы могут быть обострены, например, вопросами интеллектуальной собственности на технологию изготовления изделий МСТ, невоспроизводимостью характеристик экспериментальных образцов, затяжными процессами отработки технологии и т.д. Все это приводит к торможению освоения и задержке начала получения прибыли от выпуска продукции. В ряде случаев происходил разрыв взаимоотношений, что приводило к большим финансовым потерям. Анализ взаимоотношений *Fabless-* и *Foundry*-компаний представляется интересным тем, что имеет общий характер и применим не только для развитой рыночной экономики.

Взаимоотношения Fabless- и Foundry-компаний при организации производства КУ МСТ

В работе [27] сформулированы 10 основных критериев для *Fabless*-компаний при поиске *Foundry*компании как производителя своих КУ МСТ. К ним отнесены: ожидания потребителя, цены, интеллектуальная собственность, финансы, технологическая платформа процессов, тип *Foundry*, масштабируемость и совместимость технологий, местоположение *Foundry*, управление клиентами и качество. Рассмотрим подробнее наиболее важные критерии.

Ожидания потребителя. Fabless-компания должна четко охарактеризовать статус своей разработки КУ МСТ. Это дает возможность четко сформулировать цель обращения на Foundry (поиск поставщика, партнера, инвестора, подготовка массового производства и т.д.). Очевидно, что Foundry также должна убедиться в реальности изделия и предлагаемого разработчиком бизнес-плана.

Дизайн КУ МСТ не может быть просто передан на любую фабрику для массового производства. Подавляющее большинство производителей КУ МСТ базируются на базовой субмикронной технологии КМОП. Используются стандартизированные, но не абсолютно идентичные, отработанные десятилетиями технологические процессы. Однако технология изготовления любого КУ МСТ содержит как минимум один или несколько специальных критических технологических процессов. Такими нестандартными для КМОП ИМС технологических процессов являются, например, двусторонняя фотолитография, сращивание кремниевых подложек с последующим утонением одной из них путем шлифования/полирования, операции глубокого и сквозного плазменного травления (так называемый Bosh process), операции создания и удаления "жертвенных" слоев (sacrificial layers), операций прецизионного анизотропного травления кремния и т.д. Таких технологий на Foundry может не быть, и они потребуют значительного времени и ресурсов для постановки технологических процессов на производстве. Это также относится и к передаче КУ МСТ с одной фабрики на другую: передача технологического маршрута, в случае таковой необходимости, не является просто повторением. Как правило, необходим полный пересмотр всего технологического маршрута и его адаптация под возможности другой *Foundry*.

Подавляющее большинство коммерческих *Foundry* разрабатывает технологию собственными силами. В результате разработчик КУ МСТ может быть и не ознакомлен с детальным технологичес-ким процессом изготовления. Выдача готовых продуктов-пластин с кристаллами КУ может осуществляться по перечню взаимно согласованных параметров. Такая ситуация сохраняет для разработчика потенциальные сомнения в качестве технологии на *Foundry* в отличие от ситуации для ИМС.

Интеллектуальная собственность. КУ МСТ Fabless-компании обычно защищены патентами. При этом Foundry при разработке или адаптировании маршрута и технологии под требования заказчика будет стараться использовать свои запатентованные технические решения, позволяющие получать дополнительную прибыль. Введение в продукт различных патентованных решений неизбежно поставит вопрос об оценке их значимости в конечном продукте. Кроме того, в процессе разработки технологии возможно создание новых технологических решений, в том числе таких, которые могут вызвать корректировку дизайна КУ МСТ. В связи с этим сторонам необходимо в начале установления взаимоотношений определиться с вкладом существующей интеллектуальной собственности и с условиями владения вновь создаваемой интеллектуальной собственности.

Качество. Особенностью всех *Foundrv* для ИМС является повышенное внимание к качеству технологии. На предприятиях имеются системы качества, охватывающие все уровни: от высшего менеджмента компаний до операторов установок. Это обеспечивает близкий к 100 % выход годных ИМС. При переориентации предприятия на изготовление КУ МСТ системы качества и, соответственно, качество технологии сохраняются. Что касается уникальных процессов, то в случае приобретения Foundry необходимого оборудования и технологии вопросы качества этих техпроцессов решаются по аналогии. Однако оборудование стоит очень дорого. На стадии проведения работ по разработке технологии для конкретной Fabless-компании у Foundry может не быть уверенности в необходимости его приобретения. В этом случае выполнение уникальных операций зачастую передается на аутсорсинг в компании (или в высшие учебные заведения) с современным, но свободным от полной загрузки оборудованием. Для таких случаев вопросы контроля качества выполнения операций являются первостепенными.

Перспективные направления развития технологий МСТ

Перспективными направлениями разработок согласно прогнозу компании Yole Developpement до 2025 г. являются КУ МСТ, основанные на новых принципах детектирования. К ним отнесены, в частности, газовая хроматография, нано-, масс-спектроскопия, кварцевые микровесы, нанооптические устройства и др. [28].

Изложенные выше соображения указывают на потенциальные затруднения в реализации новых, сложных типов КУ МСТ для отечественных *Fabless*-компаний. Такие компании проводят разработки КУ МСТ, измерения и испытания изделий в чипах и корпусах, отрабатывают метрологические вопросы. Однако доступность отечественных предприятий с технологическим оборудованием ограничена, а современных крупных *Foundry* нет; освоение новых изделий на зарубежных *Foundry* скорее также маловероятно. Такое положение с КУ МСТ принципиально отличается от ИМС, доступность к которым у отечественных разработчиков имеется без каких-либо организационных ограничений.

Одним из путей развития новых типов отечественных КУ МСТ представляется создание лабораторных технологий на технологических линиях малой производительности. Это может дать возможность сочетания исследований, разработки и выпуска небольших опытных партий изделий. С учетом сложившейся типичной длительности этапов разработки КУ МСТ (не менее 10 лет), такие линии за несколько лет функционирования могут дать возможность отработать и подготовить наиболее перспективные типы КУ МСТ для передачи в производство.

Этому подходу несколько противоречит высокая цена современного серийно выпускаемого для КУ МСТ оборудования. Оно предназначено для подложек более 150 мм. Установки на пластины меньшего диаметра, как правило — 100 мм, не перекрывают весь диапазон необходимых современных технологических процессов, затрудняя комплектацию технологических линий. Современные подходы к выпуску технологического оборудования для КУ МСТ не учитывают избыточность размера подложек для организации исследований, разработок и опытного производства. Для проведения исследований и разработок вполне достаточным является размер кремниевых подложек диаметром около 40 мм и менее. Малый размер исходных подложек дает возможность в разы сократить затраты на материалы и технологию. При разработке специального оборудования для таких подложек резко снижается стоимость комплекта необходимых установок. В частности, многолетний опыт автора [29, 30] указывает на возможность существенного "обратного" масштабирования реакторов для осаждения тонкопленочных материалов из газовой фазы для использования пластин малого размера.

Иллюстрацией такого подхода является, например, концепция "Minimal Fab" (Япония), построенная на базе принятого алгоритма изготовления полупроводниковых изделий. Это малогабаритная производственная линия (Room-size Minimal Fab) предназначена для проведения исследований, разработок и производства на пластинах кремния размером 0,5 дюйма [31]. Линия состоит из установок одинакового размера и формы и не требует больших площадей, специализированной чистой комнаты. Примеры реализации установок для фотолитографии и получения тонких пленок методом осаждения из газовой фазы приведены в работах [32, 33].

В пользу перехода на меньшие по размеру подложки свидетельствует и вывод о постепенном сворачивании направления интеграции КУ МСТ и ИМС на одном кристалле в пользу интеграции кристаллов по технологиям TSV. В этом случае отсутствует необходимость подгонки маршрута КУ МСТ и технологической линии под маршрут КМОП ИМС. В частности, более тонкие пластины могут существенно облегчить операции глубокого травления мембран, сквозного травления отверстий, исключить необходимость утонения пластин и т.д.

Минимизация оборудования, в свою очередь, может дать толчок к развитию малогабаритных устройств ввода и измерения расходов химических реагентов в реакторы, измерителей вакуума, давления, температуры. Такие устройства, в том числе, могут быть реализованы с помощью технологий MCT.

Заключение

В работе рассмотрены основные тренды развития современных компонентов и узлов МСТ. Типичные сроки разработки и освоения КУ МСТ могут составлять десятки лет. Показаны возможные направления развития КУ МСТ на ближайшее десятилетие, а также необходимость кооперации компаний-разработчиков КУ MCT (Fabless) и технологических компаний (Foundry). Проанализированы некоторые проблемы и особенности взаимоотношений Fabless- и Foundry-компаний при освоении современных КУ МСТ. Сделан вывод о целесообразности разработки оборудования и технологии лабораторных технологических линеек для работы на кремниевых пластинах малого диаметра. Такие линейки могут дать возможность интенсификации работ в области КУ МСТ и ускорения их подготовки к внедрению в производство.

Список литературы

1. Evans D. Internet of Everything изменит мир к лучшему (электронный pecypc). URL: http://www.cisco.com/web/ RU/news/releases/txt/2012/111512d.html

2. Мальцев П. П. О классификации в области микросистемной техники // Нано- и микросистемная техника. 2005. № 1. С. 9—10.

3. Бочаров Л. Ю., Мальцев П. П. Состояние и перспективы развития микроэлектромеханических систем за рубежом // Нано- и микросистемная техника. 1999. № 1. С. 41–46.

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

5. Вернер В. Д., Мальцев П. П., Резнев А. А., Сауров А. Н., Чаплыгин Ю. А. Современные тенденции развития микросистемной техники // Нано- и микросистемная техника. 2008. № 8. С. 2—6.

6. Сысоева С. МЭМС-технологии: простое и доступное решение сложных системных задач // Электроника НТБ. 2010. № 7. С. 80—89.

7. Petersen K. E. Silicon as a Mechanical Material // Proceedings of IEEE. 1982. Vol. 70. N. 5. P. 420–456.

8. **SUMMITVtm** — Five Level Surface Micromachinning Technology Design Manual, version 3.2. Issued 10/25/2012.

9. **Bonding** in Microsystem Technology / Ed. by J. A. Dziuban. Springer, 2006. P. 1–331.

10. Мальцев П. П., Никифоров А. Ю., Телец В. А. Интегрированные технологии микросистемной техники // Нанои микросистемная техника. 2001. № 11. С. 22–24.

11. Fischer A. C., Forsberg F., Lapisa M., Bleiker S. J., Stemme G., Roxhed N., Niklaus F. Integrating MEMS and ICs // Microsystems & Nanoengineering. 2015. N. 1. P. 15005–15021.

12. Yole Developpement web page (электронный ресурс). URL: http://www.i-micronews.com/reports/mems-sensors-report. html.

13. **MarketsandMarkets** web page (электронный ресурс). URL: http://www.marketsandmarkets.com/sensors-and-instrumentsmarket-research-106.html manufacturing/microelectromechanical-systems-mems-technology-markets-smc051d.html.

14. **BCC** Research web page (электронный ресурс). URL: http://www.bccresearch.com/market-research/semiconductor.

15. **IHS** Technology web page (электронный pecypc). URL: https://technology.ihs.com/Categories/450486/mems-sensors.

16. Майская В. МЭМС рынок. Стойкий продолжительный рост // Электроника НТБ. 2012. № 5. С. 42—55.

17. Майская В. Амбициозные планы промышленности МЭМС. От миллионного долларового рынка к триллионному? // Электроника НТБ. 2012. № 8. С. 101–105.

18. **Wise K. D.** Integrated sensors, MEMS, and microsystems: Reflection on a fantastic voyage // Sensors and Actuators A. 2007. Vol. 136, N 1. P. 39–50.

19. Doe P. The future of MEMS: Rethinking business strategies and manufacturing technology for volume systems markets (электронный ресурс). 2011. URL: http://scme-nm.org/files/ The%20future%20of%20MEMS.pdf

20. Yole Developpement report presentation "Emerging MEMS Technologies and Markets" (электронный ресурс). 2013. URL: /http://www.i-micronews.com/component/hikashop/product/ emerging-mems-2013.html?Itemid=0

21. **Bryzek J.** Roadmap to a \$Trillion MEMS Market. URL: http://www.meptec.org/Resources/Roadmap%20to%20a%20\$T rillion%20MЭMC%20Market,%20Meptec.pdf.

22. Yole Developpement report presentation "6 and 9-Axis Sensors Consumer Inertial Combo Sensors". 2014. URL: http://www.i-micronews.com/component/hikashop/product/the-6-and-9-axis-sensors-consumer-inertial-combo-sensors.html?Itemid= 023.

23. Yole Developpement report presentation "MEMS & Sensors for Mobile Phones and Tablets". 2014. URL: http://www.i-micronews.com/component/hikashop/product/mems-sensors-for-mobile-phones-and-tablets.html?Itemid=0

24. Alberts D. S., Garstka J. J., Stein F. P. Network Centric Warfare: Developing and Leveraging Information Superiority // DoD C4ISR Cooperative Research Program. CCRP. 2nd Edition (Revised). 2000. P. 1–284.

25. Yole Developpement report presentation "Sensors for Wearable Electronics & Mobile Healthcare". 2015. URL: http:// www.i-micronews.com/component/hikashop/product/sensorsfor-wearable-electronics-mobile-healthcare.html?Itemid=0

26. **International** Technology Roadmap for Semiconductors web page. URL: http://www.itrs2.net.

27. **Micrel** web page. How to Pick a MEMS Foundry: Top 10 Selection Criteria. 2014. URL: http://www.micrel.com/_Foundry/ Micrel_Foundry_Selection_WP.pdf

28. Yole Developpement report presentation New Detection Principles & Technical Evolution for MEMS & NEMS. 2014. URL: http://www.i-micronews.com/reports/mems-sensorsreport.html. 29. Васильев В. Ю. Тренды развития методов химического осаждения из газовой фазы тонкопленочных материалов для прецизионных технологий // Нано- и микросистемная техника. 2014. № 9. С. 37—44.

30. **Vasilyev V. Yu.** Thin Film Chemical Vapor Deposition in Integrated Circuit Technology: Equipment, Methodology and Thin Film Growth Research Experience // Nova Science Publishers, Inc., New York. 2013. 314 p.

31. **Haro S.** Minimal FAB. URL: industrie.com/it/ mediatheque/6/4/7/000004746.pdf.

32. **Khumpuang S., Maekawa H., Haro S.** Photolithography for Minimal Fab System // IEEE Transactions on Sensors and Micromachines. 2013. Vol. 133. N. 9. P. 272–277.

33. Li N., Habuka H., Ikeda S., Hara S. Silicon chemical vapor deposition process using a half-inch silicon wafer for Minimal Manufacturing System // Physics Procedia. 2013. Vol. 46. P. 230–238.

V. Yu. Vasilyev, D. Sc., Professor of Novosibirsk State Technical University, Deputy Director General, SibIS LLC, Novosibirsk

Trends in Development of the Technologies and Production of the Micro System Components

The article presents a review of the modern trends in development of the technology and production of the micro system technology (MST) components, it analyzes the present state and the basic factors of development, main developers and manufacturers of MST components. It devotes attention to certain specific features of the interaction between the developers and the manufacturers (fables — foundry interaction), which should be taken into account to ensure fast prototyping and manufacture of MST products, and identifies certain promising trends for the future development of MST products.

Keywords: micro system technologies, MST, development trends, fables - foundry interaction

Introduction

Development of the precision technologies abroad is determined by the market-driven technology, purposefully formulated by the biggest market players. As an example of such an approach to development for decades can be the fact that the staff of Cisco Co., US manufacturer of communication equipment, includes an official futurologist, with the results of whose activity it is possible to familiarize oneself on the site of the company [1].

The major competitive advantages of the products are the speed of their introduction in the market and the prices, determined by the cost and scale of production. Microsystem technologies (MST) are the major components of the high technologies, but historically they lag behind the technologies of the integrated microcircuits (IC). MST technologies helped to develop the pressure sensors, injectors, accelerometers, gyroscopes, gas sensors, microdisplays, biochemical sensors, speed sensors, microrelays, oscillators, etc. The main advantage of the components based on MST technologies are their small dimensions, mass character of their production, high repeatability of their characteristics and reliability. (The term "components" is used according to classification [2], and characterizes "the products made on one chips by the methods of microelectronic technology and containing from 1 up to 1000 mechanical elements). The current state and prospects for MST technologies at the beginning of the century are considered in [3–6]. Over 30 foreign monographies were devoted to MST technologies and devices.

In recent 40 years the major events in development of MST technologies included:

— scientific and technical substantiation of the basic constructional material for MST technologies — monocrystalline silicon [7];

— development of the technological processes for formation of the precision three-dimensional structures by liquid and plasma etching, formation and removal of the "sacrificial layers" for one- or two-jammed multilayered beam "suspended" elements of the structures [8];

— development of the technologies for connection of the silicon substrates (wafer bonding) [9];

— development of the process flows and mastering of production of the MST individual components (pressure sensors), and then of a wider nomenclature of MST nodes, including the ones integrated with IMC directly in a silicon substrate [10] or in the form of separate components of chips in special packages [11];

 development of the nomenclature of packages and packaging technologies, measurements and tests of MST for components and units;

— solving of the metrological issues. The term "units" is used according to classification [2]) and it characterizes "the products consisting by 100 % from the components of the microsystem technologies". MST technologies develop within the trends of the technologies of assemblage of the tiny multipurpose devices known as 3D assemblage at the level of plates (Wafer Level Packaging — WLP) and йtagure assemblage with the use of interconnections through the through apertures in silicon (Through Silicon Vias, TSV) [11].

The biggest foreign analytical companies involved in electronic technologies (Yole Development [12], Markets and Markets [13], BCC Research [14], HIS Technology [15]) give forecasts of a stable high (at the level over 10 %) increase of the annual production of the widely known nomenclature of the MST components and units. The domestic reviews on these subjects are presented in [16, 17]. The literature analysis points to the expectations of the all-round analysis and preparation of opportunities for an explosive development of the technologies and production growth for decades ahead [17]. The growth driving forces are expected to be the mass products of high technologies united by the idea of construction of the network systems on the basis of Internet [1].

It is obvious, that such forecasts of growth pose the tasks of organizing mass production of a huge number of the already known components and units of MST technologies and development and mastering of the new, emerging types of devices. The article reviews briefly certain basic trends and issues of R&D and production of the components and units (CU) of the MST technologies on the basis of the silicon substrates.

The present state and major factors for development of CU MST technologies

The stages of development of MST technologies were characterized in various ways [18, 19]. In [18] several ten-year stages were singled out. At the first stage (from mid 1950s up to beginning of 1960s) the research works were aimed at creation of the foundations for the technology. Scientific divisions of large companies, like Bell Telephone Laboratories, and some academic institutions participated in the works. Special attention was devoted to important dual technologies, first of all, to development of precise sensors. At that, only high reliability of the products was required, while their high cost was not decisive. The second stage of development of MST technology (1960s) was determined by powerful military-industrial US companies: Fairchild, Westinghouse, Honeywell, which were eager to commercialize the experimental results. At that time the first pressure sensor made by MST technology appeared. In 1967 the necessity was shown to use "the sacrificial layers" for separation of the micromechanical elements of the components from the silicon substrate. And, when the prospects for a new direction became clear, by the beginning of 1970s, target financing was allocated to the academic science for reduction of the costs and expansion of the scopes of application of CU MST. At the third stage (1970s) the first accelerometer and the first jet nozzles appeared, the technology of volume liquid etching of silicon for formation of MST elements: membranes, beams, etc, was developed. The 1980s wit-

nessed development of the technologies for manufacture of CU MST. At that time the first system publication appeared [7] substantiating application of the silicon as a semi-conductor and constructional mechanical material. LIGA process flow was developed (a combination of lithograph, galvanoplastics and press-forming for creation of high-aspect microstructures - the structures with a high parity of height and width). The 1990s were marked by an intensive development of CU MST technologies (patenting of deep jet ionic etching), beginning of sales of ADXL50, the first accelerometer from Analog Devices Co., appearance and development of bio- and optoelectronic MST components. At the beginning of the decade Microelectronic Center of North California got support from the Defense Advances Research Project Agency for development of Multi-User MEMS Process technology. Then a micromechanical era came, which continues now. A specific feature of this stage is development of wireless MST devices.

In the evolutionary development of the products based on MST technologies four breakthrough events are marked in [19]. The first event (1990s, characterized as the "Level of Processes") was the international success of Sensonor Co. with a sensor for safety air cushions for cars - SA20 device. About 35 million pieces of the sensors were sold in the world, which allowed the company to get 60-70 % of the sensors' market in Europe. The second event (2000s, characterized as "MST Level ", in the original – MEMS level) according to the author, was continuation of development of CU MST with reference to the automobile inertial systems and success of Texas Instruments in the field of the digital micromirror devices. The third event (2010s, "assemblage/packaging level") was intensive development of the assembly technologies, which played the major role in manufacture of CU MST. In particular, the first products appeared, packaged with the use of TSV. The event of the near future (2020s, "System Level"), as in [19] is believed, will be a gradual disappearance of the devices including MST-IC on one chip in favor of the intensive development of 3D integration of chips of MST components.

Development of concrete products on the basis of MST technologies occurred according to the rule of "one type of a product — one process — one type of package — one type of IC — one type of the test system". Various CU MST are at various stages of their life cycles, which are presented in the S-formed curve, (fig. 1). The following phases are named: Emerging, Development, Mature and Decline. From the abovementioned CU MST the heads of the jet printers are the closest to the beginning of the decline phase.

Duration of preparation of MST products for production is historically unpredictable. In [21] the data are generalized about the period of introduction in the market of the pressure sensors, accelerometers, gas sensors, valves, injectors, displays, biochemical sensors, radio-frequency CU MST, speed sensors, microrelays, and oscillators. For the specified CU MST the average time of commercialization was about 30 years. Within this interval the average R & D time was about ten years, time of evolution of the devices — about eight years, time of the works for the cost reduction down to an acceptable level (cost reduction) — about twelve years.

Technology development allowed us to reduce the development time of the newly emerging CU MST, which is demonstrated in fig. 2 (see 3-rd side of the cover) [22]. The time from research and development up to release of the market products was reduced from 21 years for the pressure sensors till 11 years for the oscillators. Nevertheless, the cost reduction period remains rather long.

In the mature phase the batch production of CU MST is organized in accordance with the well-known technological processes. Their perfection follows the way of improvement of the economic indicators of production. The trend of the dimension change of the main mass CU MST in recent 7 years points to almost a double reduction of their area [22]. Actually this means a possibility of doubling of the production volumes.

A common trend for CU MST in the mature phase is integration of the devices, for example, due to the 3D assemblage. At that, the functionality of CU MST is also raised. For example, the road map for development of the sensors for mobile applications from Yole Developpement [23] predicts as a general development direction the expansion of the functions of CU MST from detection and measurement (which are carried out by the sensors) to the functions of interpretation of data for solving of the tasks of the situational awareness of the consumers.

Due to economic reasons the most interesting and promising are CU MST referred to the "emerging" life cycle. However, CU of this phase of development have a conditional technological route, which should be improved for introduction in manufacture. Development of products for CU MST groups, which are in the "mature" phase is inexpedient without a radical improvement of the characteristics demanded by the market. For example, among such characteristics it is possible to mention expansion of the temperature range of the silicon MST pressure sensors to the area of higher temperatures. And, if for the commercial applications it is economically inexpedient, for the special purpose sensors it is of great interest. In this case development of the sensors will demand new technological solutions and, thus, it can be referred to the "emerging" phase.

Development of the concepts connected with the network systems based on Internet [1] essentially complicates manufacture of CU MST. In literature various terms of such systems are discussed: Internet of Everything, IoE, Internet of Things, IoT, etc. The essence of the concepts boils down to organization of huge multipurpose network systems of various levels, sublevels, sensor systems and subsystems, including with the data accumulation, preliminary processing and transmission with the use of the "cloud" solutions, data storage systems and special software. At that, absence of the initially fixed borders of the systems' construction is important and means a possibility of their development and expansion.

Examples of the really discussed concepts are the ideas of "smart city", "smart house", "portable electronics", and modern mobile communications. Similar algorithms for construction of the network systems are applied for solving of the military and defensive tasks. For example, pilotless aircraft, autonomous submarines, mini- and micro-satellites are considered as the components of all the environments (sea, land, atmosphere, near space) of the network-centric system of the military robotized vehicles (Network-Centric Warfare), for example, [24].

The basic type of the perspective network systems are the sensors, first of all CU on the basis of MST technologies on the silicon substrates. It is predicted, that by the end of 2018 the number of CU MST in the smart phones will increase from 14 up to 20 pieces (at that, they will be more complex, integrated CU MST) [23]. In 2015–2020 the increase of the use of CU MST in the products of the palm-version portable electronics is predicted from 50 up to 250 million pieces [25]. The most ambitious growth forecasts for the markets of products of the MST technologies [17, 21] are based, among other things, on the prospective increase of the number of CU MST per one consumer up to 1000 pieces.

Major manufacturers of MST products

Evolutionary development of CU MST and transition to their mass production change considerably the situation in the market. CU MST producers are compelled to search for ways to accelerate the development of cheap large-scale productions with the use of opportunities for success. Necessity of cost reduction compels the producers to reduce the dimensions of CU MST and to raise the integration degree due to the use of WLP and TSV technologies. The major three players in CU MST market are Texas Instruments, STMicroelectronics and Robert Bosh with the annual volume of production of each within 0,8–1 billion dollars for the own devices. Those enterprises belong type of "the vertically-integrated companies", performing the works from development up to batch production.

However, practically all new CU MST are developed by the enterprises working by Fabless model. Such enterprises have no production of CU MST of their own and are engaged in development, research, measurements, tests, metrological questions, development of packaging technologies of CU MST, standardization, etc. Fabless enterprises have to look for opportunities for realization of unique CU MST at the enterprises possessing the corresponding technologies. It can be small companies with the necessary complete set of the technological equipment. However, a mass production of CU MST developed by Fabless companies is possible only by big manufacturers.

Such big manufacturers are silicon factories (Wafer-Fab), working by the Foundry (production) models. Originally the Foundry enterprises were constructed for production of various submicron IC. They had the capacities for production of several tens of thousands of silicon wafers with diameter of 200 mm per month. When the resource of the complete set of the processing equipment was finished, it was replaced for mastering of the next generation of IC. However, a reorientation of the available productions on development of CU MST technologies provides an excellent alternative. An obvious gain for the factories is in essentially lower requirements to the manufacturing technologies of CU MST, than to IC. It is an opportunity to apply the accumulated experience and prolong the periods of operation of the processing equipment. As a result the enterprises have lower production costs, stable and higher output of the suitable products, save time on penetration of the market due to spending less time on the technology transfer and a quick transition to production. Reorientation of the Foundry enterprises manufacturing submicron IC to production of MST is a trend of recent years. For example, such enterprises are the following semi-conductor companies: Taiwan Semiconductor Manufacturing Company (TSMC) and Global Foundries, which in 2011 demonstrated, accordingly, about 200 and 178 % increase of the CU MST production.

Possible cooperation of the companies working by Fabless and Foundry models provides an alternative to the traditional slow mastering of CU MST. This way consists in mastering of the technology on the labware with the further transfer of the products to the industrial enterprises. At that, there is a basic difference in the mutual relations of the developers and manufacturers of IC and CU MST with the Foundry companies. Development of IC is determined by the roadmap of development of the microelectronic technologies (International Technology Roadmap for Semiconductors, ITRS) [26]. ITRS gives directions for development of microelectronics for the business participants on a global scale. One of consequences of ITRS is occurrence of the unified design-technology standards and technology flows (for example - CMOS) for production of IC of the same type in all the Foundry enterprises. Mutual relations of the Fabless companies and IC Foundry enterprises are based on the Process Design Kit (PDK). Those documents characterize quantitatively the industrial technology process flows (for example – CMOS $0,18 \mu m$). The Foundry enterprises ensure manufacture of the experimental samples within the framework of Shuttle Service or MPW (Multi Project Wafer) programs. The quality of the manufacturing techniques, including presentation of the objective data about the results of measurement of the technology parameters is guaranteed.

For CU MST the situation is essentially different because of absence of the generalizing roadmaps, standards and variety of CU MST, each of which is realized by its own process flow. Manufacturing techniques of CU MST are custom-made by the producers of CU MST for the individual customers, that is, for a certain Fabless company. And this is a basis for cooperation in production of CU MST.

Historically the interaction of a developer of CU (the owner of the design of a product) with its manufacturer (the developer and the owner of the technology) has always caused a lot of issues. The issues may be aggravated by the questions of intellectual property for the manufacturing techniques of MST products, nonreproductivity of the characteristics of the experimental samples, long processes of mastering of technology, etc. All this retarded the development and gaining of profit from the productions. In some cases there was a rupture of mutual relations, which led to big financial losses. The analysis of mutual relations of the Fabless and Foundry companies is interesting, because it has a common character and is applicable not only to a developed market economy.

Mutual relations of the Fabless and Foundry companies in CU MST production

In [27] 10 basic criteria are formulated for the Foundry companies in their search for manufacturers of CU MST. Among them are: the consumer's expectations, price, intellectual property, finances, technological platform, type of a Foundry, scalability and compatibility of the technologies, venue of a Foundry, management of clients and quality. We will consider in more detail the most important of the criteria.

Criterion of the consumer's expectations. A Fabless company should characterize accurately the status of its development of CU MST. This makes it possible to formulate precisely the purpose of reference to a Foundry (search for a supplier, partner, investor, preparation of mass production, etc.). It is obvious that a Foundry also should be sure of the feasibility of a product and of the business plan offered by the developer.

A design of CU MST should not be simply transferred to any factory for its mass production. The overwhelming majority of CU MST producers have the basic submicron CMOS technology. The standardized, although not identical technological processes proved by decades are used. A technology for production of any CU MST contains one or several special critical technology processes. Such non-standard for CMOS IC technology processes are, for example, the bilateral photolithography, bonding of the silicon substrates with thinning of one of them by grinding/polishing, operation of a deep and through plasma etching (Bosh process), creation and removal of the sacrificial layers, operations of the precision anisotropic etching of silicon, etc. Such technologies may not be available in a Foundry, and they will demand a lot of time and resources for establishment of the technology processes. This also refers to the transfer of CU MST from one factory to another: transfer of a technology flow, if necessary, is

not simply its repetition. As a rule, a full revision of a technology process flow and its adaptation to the possibilities of another Foundry is necessary.

The overwhelming majority of the Foundry enterprises develop technologies by themselves. As a result a developer of CU MST may not be acquainted with the detailed process of the manufacture. Provision of the product wafers with CU chips may be carried out in accordance with the list of the agreed parameters. Such a situation preserves for a developer potential doubts in the quality of the technology of a Foundry, unlike a situation for IC.

Criterion of intellectual property. CU MST of the Fabless companies are usually protected by patents. During development or adaptation of the process flow and technology to the requirements of a customer, a Foundry will do its best and use the patented technical solutions, allowing it to get a profit. Introduction of various patented solutions will inevitably raise the question of evaluation of their importance in the end-product. Besides, in the course of development of a technology, creation of new technological solutions, including the ones, which can change the design of CU MST, is possible. In this connection, in the beginning of their mutual relations the parties should solve the question of contribution of the intellectual property and of the rights for the created intellectual property.

Criterion of quality. A specific feature of a Foundry for IC is a special attention to the quality of the technology. The enterprises have their systems of quality embracing the levels from the higher management down to the operators of the installations. This ensures an output close to 100 % of serviceable IC. In case of a reorientation of an enterprise on manufacture of MST, the system of quality and the quality of the technology are preserved. As far as the unique processes are concerned, in case of acquisition of the necessary equipment and technology by a Foundry, the questions of the quality of the technical processes are solved in a similar way. However, the equipment is very expensive. At the stage of development of a technology for a concrete Fabless company, a Foundry enterprise may not be sure in the necessity of its acquisition. In this case implementation of the unique operations is frequently transferred to outsourcing, to the companies (in higher educational institutions) with the available equipment. For such cases the questions of quality control in implementation of the operations are of a paramount importance.

Perspective directions for development of MST technologies

According to the forecast of Yole Developpement, in the period up to 2025 the perspective development directions are the CU MST, based on new detection principles. Among them are, in particular: gas chromatography, nano- mass spectroscopy, quartz microscales, nano-optical devices, etc. [28]. The above considerations point to potential problems with realization of new CU MST for the domestic Fabless companies. Such companies undertake R & D in the field of CU MST, measurements and tests of the products in "chips" and packages, and solve the metrological questions. However, availability of the domestic enterprises with the process equipment is limited, while there are no large Foundries; mastering of new products in a foreign Foundry is also rather unlikely. Such a situation with CU MST essentially differs from IMC, the access to which for the domestic developers is available without any restrictions.

One of the ways for development of new domestic CU MST is creation of the laboratory technologies on the technological lines of small productivity. This can be ensured by a combination of the research works, development and production of experimental batches of goods. Taking into account the actual typical duration of the development cycles of CU MST (not less than 10 years), in several years of their functioning such lines can master and prepare the most perspective CU MST for transfer to the production.

This approach is contradicted by a high cost of the serially produced CU MST equipment. It is intended for the substrates over 150 mm. Wafers of smaller diameter, as a rule of 100 mm, do cover the range of the necessary technology processes, complicating provision of complete sets for the lines. The approaches to production of the process equipment for CU MST do not consider the redundancy of the dimensions of the substrates for R&D and pilot production. For the research and development the size of the silicon substrates with diameter of about 40 mm and less is sufficient. A small size of the substrates gives a chance to reduce many times the costs of the materials and the technology. During development of special equipment for such substrates the cost of a complete set of installations decreases sharply. In particular, long-term experience [29, 30] points to a possibility of "a reverse" scaling of the reactors for chemical vapor deposition of thin-film materials from the gas phase for the wafers of small sizes.

An illustration to such an approach is the concept of Minimal Fab (Japan) based on the algorithm for manufacture of the semiconductor products. It is a smallsized industrial line (Room-size Minimal Fab) for R&D on silicon wafers of the size of 0,5 inches [31]. The line consists of the installations of the identical sizes and forms, and does not demand big areas and special clean rooms. Examples of realization of the installations for the photolithography and reception of thin films by the method of deposition from the gas phase are presented in [32, 33].

An advantage of the transition to the smaller-size substrates is proved by the conclusion on a gradual reduction of integration of CU MST and IC on one chip in favor of integration of the chips by TSV technologies. In this case there is no necessity of adjustment of CU MST route and of a technology line to the flow of CMOS IC. In particular, thinner wafers can essentially facilitate operations of deep etching of the membranes and through etching of apertures, they do not require thinning of wafers, etc.

Minimization of the equipment, in turn, can give an impetus to development of the small-sized input equipment and measurements of consumption of the chemical reagents in reactors, measuring instruments of vacuum, pressure and temperature. Such devices can be realized, among other things, by means of MST technologies.

Conclusion

The article discusses the basic trends in development of the components and units of MST. Typical periods of development and mastering of CU MST can be tens of years. The article outlines the possible development trends for the nearest decade. It demonstrates the necessity for cooperation of the companies-developers of CU MST (Fabless) and the technology companies (Foundry). It analyzes certain issues and specific features of the interaction between the Fabless and Foundry companies in mastering of modern CU MST. It also draws a conclusion on the expediency of development of the equipment and technology for the organization of the laboratory technology lines for work on silicon wafers of the small diameters. Such lines will give an impetus to intensification of the works in the field of CU MST and acceleration of their preparation for introduction in industry.

References

1. **Evans D.**, *Internet of Everything izmenit mir k lucshemu*. URL: http://www.cisco.com/web/RU/news/releases/txt/2012/ 111512d.html. (In Russian)

2. **Maltcev P. P.**, O klassifikacii v oblasti mikrosistemnoi tekhniki, *Nano- i mikrosistemnaja tehnika*, 2005, no. 1, pp. 9–10. (In Russian).

3. Bocharov L. Yu., Maltcev P. P., Sostoyaniye i perspektivi razvitiya mikroelektromekhanicheskih system za rubeshom, *Na-no- i mikrosistemnaja tehnika*, 1999, no. 1, pp. 41–46. (In Russian).

4. **Ivanov A. A., Maltcev P. P., Telec V. A.**, O napravleniyah razvitiya mikrosistemnoi tekhniki, *Nano- i mikrosistemnaja tehnika*, 2006, no. 1, pp. 2–12. (In Russian).

5. Verner V. D., Maltcev P. P., Reznev A. A., Saurov A. N., Chapligin Yu. A., Sovremennii tendencii razvitiya mikrosistemnoi tekhniki, *Nano- i mikrosistemnaja tehnika*, 2008, no. 8, pp. 2–6 (In Russian).

6. **Sisoeva C.**, MEMS-tekhnlogii: prostoye I dostupnoye resheniye sloshnih sistemnih zadach, *Elektronika NTB*, 2010, no. 7, pp. 80–89. (In Russian).

7. Petersen K. E., Silicon as a Mechanical Material, *Proceedings of IEEE*, 1982, vol. 70, no. 5, pp. 420–456.

8. **SUMMITVtm** — Five Level Surface Micromachinning Technology Design Manual, version 3.2, Issued 10/25/2012.

9. *Bonding in Microsystem Technology*, Edited by Dziuban J. A., Springer, 2006, 331 p.

10. **Maltcev P. P., Nikiforov A. Yu., Telec V. A.**, Integrirovannie tekhnologii mikrosistemnoi tekhniki, *Nano- i mikrosistemnaja tehnika*, 2001, no. 11, pp. 22–24 (In Russian).

11. Fischer A. C., Forsberg F., Lapisa M., Bleiker S. J., Stemme G., Roxhed N., Niklaus F., Integrating MEMS and ICs, *Microsystems & Nanoengineering*, 2015, no. 1, pp. 15005–15021. 12. *Yole Developpement web page*, URL: http://www.i-micro-news.com/reports/mems-sensors-report.html.

13. *MarketsandMarkets web page*, URL: http://www.marketsandmarkets.com/sensors-and-instruments-market-research-106. html manufacturing/microelectromechanical-systems-memstechnology-markets-smc051d.html.

14. *BCC Research web page*, URL: http://www.bccre-search.com/market-research/semiconductor.

15. **IHS** Technology web page, URL: https://technology. ihs.com/Categories/450486/mems-sensors.

16. Mayskaya V., MEMS rinok. Stoikii prodolshitelni rost, *Elektronika NTB*, 2012, no. 5, pp. 42–55 (In Russian).

17. **Mayskaya V.**, Imbiziozniye plani promishlennosti MEMS. Ot millionnogo dollarovogo rinka k trillionnomu? *Ele-ktronika NTB*, 2012, no. 8, pp. 101–105 (In Russian).

18. **Wise K. D.**, Integrated sensors, MEMS, and microsystems: Reflection on a fantastic voyage, *Sensors and Actuators A.*, 2007, vol. 136, no. 1, pp. 39–50.

19. Doe P., The future of MEMS: Rethinking business strategies and manufacturing technology for volume systems markets, 2011. URL: http://scme-nm.org/files/The%20future%20of% 20MEMS.pdf

20. **Yole Developpement** report presentation "Emerging MEMS Technologies and Markets", 2013. URL: /http://www.i-micronews.com/component/hikashop/product/emerging-mems-2013.html?Itemid=0

21. **Bryzek J.**, *Roadmap to a \$ Trillion MEMS Market*. URL: http://www.meptec.org/Resources/Roadmap%20to%20a%20\$ Trillion%20MЭMC%20Market,%20Meptec.pdf.

22. Yole Developpement report presentation, 6 and 9-Axis Sensors Consumer Inertial Combo Sensors, 2014. URL: http://www.i-micronews.com/component/hikashop/product/the-6-and-9-axis-sensors-consumer-inertial-combo-sensors.html?Itemid= 023.

23. Yole Developpement report presentation, *MEMS & Sensors for Mobile Phones and Tablets*, 2014. URL: http://www.imicronews.com/component/hikashop/product/mems-sensors-for-mobile-phones-and-tablets.html?Itemid=0

24. Alberts D. S., Garstka J. J., Stein F. P., Network Centric Warfare: Developing and Leveraging Information Superiority, *DoD C4ISR Cooperative Research Program. CCRP*, 2nd Ed. (Revised), 2000, pp. 1–284.

25. **Yole Developpement** report presentation, *Sensors for Wearable Electronics & Mobile Healthcare*, 2015. URL: http://www.i-micronews.com/component/hikashop/product/sensors-for-wearable-electronics-mobile-healthcare.html?Itemid=0

26. International Technology Roadmap for Semiconductors web page, URL: http://www.itrs2.net.

27. **Micrel** web page, *How to Pick a MEMS Foundry: Top 10* Selection Criteria, 2014, URL: http://www.micrel. com/_Foundry/Micrel_Foundry_Selection_WP.pdf.

28. Yole Developpement report presentation, *New Detection Principles & Technical Evolution for MEMS & NEMS*, 2014, URL: http://www.i-micronews.com/reports/mems-sensors-report.html.

29. **Vasilyev V. Yu.**, Trends of Thin Film Deposition Methods for Precision Technologies Applications, *Nano- i mikrosistemnaja tehnika*, 2014, no. 9, pp. 37–44 (In Russian).

30. **Vasilyev V. Yu.**, *Thin Film Chemical Vapor Deposition in Integrated Circuit Technology: Equipment, Methodology and Thin Film Growth Research Experience*, New York, Nova Science Publishers, Inc., 2013, 314 p.

31. **Haro S.**, Minimal FAB, URL: industrie.com/it/media-theque/6/4/7/000004746.pdf.

32. **Khumpuang S., Maekawa H., Haro S.**, Photolithography for Minimal Fab System, IEEE Transactions on Sensors and Micromachines. 2013, vol. 133, no. 9, pp. 272–277.

33. Li N., Habuka H., Ikeda S., Hara S., Silicon chemical vapor deposition process using a half-inch silicon wafer for Minimal Manufacturing System, Physics Procedia. 2013, vol. 46, pp. 230–238.

Моделирование и конструирование MHCT Modelling and designing of MNST

УДК 681.5.08

А. С. Чернов¹, инженер, e-mail: chernov@sib-is.ru, **А. Л. Самородов**¹, вед. инженер, **С. П. Хабаров**², ст. преподаватель, **В. А. Гридчин**², д-р техн. наук, проф. ¹ ООО "СибИС" (г. Новосибирск) ² Новосибирский государственный технический университет

ФОТОЧУВСТВИТЕЛЬНЫЙ ЭЛЕМЕНТ ДЛЯ СЕНСОРА ДАВЛЕНИЯ С ОПТИЧЕСКОЙ ПРОСТРАНСТВЕННОЙ МОДУЛЯЦИЕЙ

Поступила в редакцию 04.04.2016 г.

Приведены результаты исследования фоточувствительного элемента сенсора давления с оптической пространственной модуляцией, содержащего два планарных КМОП-фотодиода. Исследованы температурные зависимости токов короткого замыкания и обратных токов фотодиодов. Рассмотрены особенности преобразовательной характеристики при дифференциальном включении фотодиодов и показана возможность линеаризации выходного сигнала сенсора. Температурный коэффициент тока короткого замыкания разработанных фотодиодов равен $\alpha_{Ik3} = 0,0014/^{\circ}$ С. Увеличение температуры приводит к повышению чувствительности сенсора давления с оптической пространственной модуляцией.

Ключевые слова: фоточувствительный элемент, оптоволокно, фотоэлектрический сенсор давления, планарные КМОП-фотодиоды

Введение

Измерения давлений в агрессивных, пожаро- и взрывоопасных средах являются актуальной технической задачей. Поиск рациональных решений ведется не только на коструктивном уровне, но и на уровне принципов преобразования. Наряду с тензорезистивными, емкостными, пьезоэлектрическими и резонансными сенсорами все активней применяются чисто оптические и оптоэлектронные сенсоры давления с использованием технологий микросистемной техники [1—7].

Микросистемная технология наиболее полно была реализована в сенсоре давления, в котором перемещение оптоволокна преобразовывалось в изменение светового потока фотодиода, работающего в режиме холостого хода [5, 6]. Согласно классификации [8] в таком сенсоре реализуется пространственная оптическая модуляция. Применение микросистемной технологии обеспечивает уменьшение габаритных размеров, юстировку узлов конструкции, управление преобразовательной характеристикой сенсора. Например, преобразовательная характеристика сенсора давления с одним фотодиодом [5, 6] имеет нелинейный характер, однако может быть превращена в квазилинейную при использовании двух фотодиодов [9]. Вопросы проектирования, выбора рациональной конструкции, экспериментальное исследование фотоэлектрических сенсоров с применением микросистемных технологий к настоящему времени в литературе представлены явно недостаточно.

Ранее, в работах [9, 10], было проведено численное моделирование упругого элемента сенсора давления с оптоволоконным излучателем, а также исследованы особенности формирования упругого элемента сложной формы методом анизотропного травления. В настоящий работе обсуждаются конструкция и экспериментальные характеристики фоточувствительного элемента, входящего в состав такого сенсора.

Структура фотоэлектрического сенсора

На рис. 1 представлен общий вид лабораторного образца сенсора. Его основными частями являются:

 упругий элемент 1 (далее — УЭ), представляющий собой кремниевый кристалл с плоской диафрагмой с обратной стороны и профилированной лицевой стороной, содержащей жесткий центр с V-канавкой для размещения оптоволокна и параллельных V-канавок на рамке мембраны, предназначенных для юстировки конструкции сенсора;



Рис. 1. Общий вид лабораторного образца: $1 - \forall \Im$, 2 -оптоволокно, $3 - \Phi \Im$ *Fig. 1. View of the laboratory sample:* 1 - EE, 2 - optical fiber, 3 - PE

Рис. 2. Общий вид кристалла ФЭ: *1* — фотодиоды, *2* — юстировочные сквозные отверстия, *3* — тестовая структура типа "греческий крест"



- оптоволокно 2, закрепленное на жестком центре и рамке упругого элемента;
- фоточувствительный элемент 3 (далее ФЭ) кремниевый кристалл, содержащий два независимых планарных фотодиода, разделенных узким промежутком, и специальные сквозные юстировочные отверстия (рис. 2).

Оптоволокно и УЭ образуют оптомеханический узел преобразования внешнего избыточного давления в перемещение пучка света, выходящего из оптоволокна. В рассматриваевом сенсоре схема преобразования измеряемого воздействия имеет вид:

$$P \to w \to y \to z_s$$

где P — давление; w и y — смещение жесткого центра и светового пятна относительно фотодиодов; z — разностный выходной сигнал. Чувствительность такого сенсора S определяется выражением

$$S = \frac{\partial z}{\partial P} = \frac{\partial z}{\partial y} \cdot \frac{\partial y}{\partial w} \cdot \frac{\partial w}{\partial P} = S_z S_y S_w,$$

где S_z , S_y , S_w — соответствующие чувствительности, которыми можно независимо управлять, добиваясь максимальных значений.

Особенностью представленного сенсора является ортогональное расположение плоскостей оптомеханического узла и Φ Э. Такая компоновка позволяет упростить изготовление частей сенсора и естесственным образом учитывает функциональное разделение между частями сенсора, которое топологически можно реализовать различными способами.

Юстировка Φ Э относительно оптомеханического узла реализуется с помощью микронаправляющих, расположенных в дополнительных V-канавках оптомеханического узла, и отверстий на кристалле с фотодиодами. Взаимное расположение Φ Э и оптомеханического узла зафиксировано клеевым соединением, которое не несет никакой механической нагрузки.

Сенсор в сборе электростатически соединенен со стеклянным основанием, вклееным в стандартный корпус ТО-8.

Фоточувствительный элемент

Кристалл ФЭ с внешними размерами $4 \times 2,5 \times \times 0,3$ мм сформирован на двусторонне полированной кремниевой пластине КЭФ 4,5 и содержит два изолированных фотодиода, изготовленных по стандартной КМОП-технологии. Фотодиоды имеют размеры 500×315 мкм по базовой области и 449×264 мкм по эмиттерной, что позволяет компенсировать возможное отклонение светового пучка от центрального положения. Такие размеры допускают работу со световым пятном до 240 мкм в диаметре и максимальным перемещением пятна до 70 мкм, как показано в статье [10]. Топологическое расстояние между диодами составляет 20 мкм, как показано на рис. 3.

Фотодиоды формировались ионной имплантацией с последующими термическими обработками и имели *n*-эмиттерную область глубиной ~0,9 мкм и поверхностным сопротивлением $\rho_s = 27$ Ом/кв; и базовую глубиной ~6 мкм с поверхностным сопротивлением $\rho_s = 1200$ Ом/кв. На кристалле ФЭ имеется пять контактов на планарной стороне, из которых четыре относятся к фотодиодам и один — к подложке кристалла. Помимо этого на кристалле имеется тестовая структура типа "греческий крест" для контроля электрических параметров слоев.

Для установки кристалла $\Phi \ni$ относительно центра излучающего оптоволокна, закрепленного на жестком центре оптомеханического узла, в кристалле были сформированы два отверстия размером, близким к диаметру юстировочных оптоволокон, расположенных в V-канавках на рамке упругого элемента оптомеханического узла. Отверстия формировались путем комбинированного жидкостного анизотропного травления с непланарной стороны пластины и изотропного плазмо-



Рис. 3. Сечение фотодиодов кристалла ФЭ Fig. 3. Section of the photodiodes of PE crystal

химического травления с планарной стороны. Анизотропное травление проводилось в 33 %-ном водном растворе КОН на глубину 265 мкм, а плазмохимическое на глубину ~40 мкм, что позволило создать отверстия размером 130 ± 5 мкм.

Электрическая схема измерений и эксперимент

Экспериментальное исследование ФЭ проводилось с применением электронного узла, структурная схема которого приведена на рис. 4. Излучение к фотодиодам подводилось от лазерного диода с оптоволоконным выходом WSLP-635-005m-M-PD мощностью до 5 мВт и длиной волны 635 нм, соединенным с оптоволоконным пигтейлом, свободный конец которого был направлен ортогонально поверхности ФЭ. Фотодиоды работали в режиме короткого замыкания и генерировали фототок, пропорциональный световому потоку. Встречное включение фотодиодов позволило сразу получить сигнал в виде разности фототоков, пропорциональных смещению светового пятна относительно центральной точки между фотодиодами. При симметричной засветке, т.е. когда световое пятно на-



Рис. 4. Структурная схема преобразования сенсора: УС (SA) — усилитель сигнала или преобразователь тока на операционном усилителе AD852, АЦП (ADC) — AD7297, MK(MC) - ATMega16U4. СИТЛ (SLCS) - стабилизированный источник тока лазерного диода, ЛД (*LD*) — лазерный диод WSLP-635-005m-M-PD, OB (*OF*) — оптоволокно 62,5/125 мкм для ввода оптического излучения в сенсор, ПК (РС) — персональный компьютер

Fig. 4. Unit circuit of the sensor transformation: SA - signal amplifier or the current converter on AD852 operational amplifier, ADC – AD7297, MC – ATMega16U4, SLCS – stabilized current source of the laser diode, LD – laser diode WSLP-635-005m-M-PD, OF – optical fiber 62, 5/125 µm

ходится в центральной точке между фотодиодами, разница фототоков равна нулю.

Усилитель сигнала (УС), реализованный на операционном усилителе AD852, преобразовывал полученный фототок в напряжение в пределах ± 20 мВ и смещал среднюю точку в положительную область на величину опорного напряжения. Далее полученный сигнал поступал на вход АЦП АD7297, который формировал 24-разрядный цифровой код, пропорциональный входному сигналу. По последовательному периферийному интерфейсу SPI цифровой код поступал на микроконтроллер ATMega16U4 и далее через USB — на компьютер для отображения и хранения информации. Этот же микроконтроллер по команде с компьютера управляет режимами работы источника тока лазерного светодиода и АЦП. В состав электрической схемы входил термосенсор для стабилизации работы источника тока.

В эксперименте исследовалась зависимость выходного сигнала z(y) $\Phi \Theta$ от перемещения светового пятна в направлении, перпендикулярном линии раздела между двумя фотодиодами. Под z(y) пони-

> мается выходной сигнал, отображаемый на экране ПК после цифровой обработки. Эта зависимость представляет собой частную преобразовательную характеристику Z = z(y), которой соответствует чувствительность S₇. В эксперименте имитировалась работа ФЭ в составе сенсора путем перемещения у оптоволокна, ориентированного по нормали к плоскости фотодиодов с помощью микрометрического устройства позиционирования светового пучка с шагом 10 мкм при температуре T = 293 °К. Температурные зависимости тока короткого замыкания и обратных темновых токов фотодиодов ФЭ измерялись в интервале темпера

тур 293...413 К в термокамере UC-20CE фирмы ТЕREНУ при фиксированном положении светового пятна и постоянной освещенности.

Экспериментальные результаты и обсуждение

Преобразовательная характеристика $\Phi \ni Z = z(y) = \Delta I_{\rm K3}(y)/R_{\rm ooc}$, полученная с использованием микрометрического позиционирования, нормированная на $Z_{\rm max}$, приведена на рис. 5, где $Z_{\rm max} = \Delta I_{\rm K3}$ _max/ $R_{\rm ooc}$, $R_{\rm ooc} = 100$ кОм ($R_{\rm ooc}$ — отрицательное сопротивление обратной связи). Перемещение светового пятна задано в единицах y/d, где d = 62,5 мкм — диаметр сердцевины оптоволокна. Максимальное значение разности тока короткого замыкания при полной засветке одного из двух фотодиодов при токе управления лазерного диода 30 мА равно $\Delta I_{\rm K3}$ _max = 0,7 мкА. Величина $\Delta I_{\rm K3}$ _max пропорциональна освещенности фотодиодов и при необходимости может быть увеличена.

Преобразовательная характеристика симметрична относительно знака перемещения и приведена для z(y) > 0. Начальный участок характеристики при 0 < y/d < 0,8 линеен и может быть использован для измерений. Пологий максимум вблизи $y/d \sim 2,7$ свидетельствует о неоднородном распределении энергии в пределах светового пятна и размытости его границ. Уменьшение сигнала $\Phi Э$ на интервале y/d > 4 связано с выходом светового пятна за границу фотодиода. По ширине пологого участка вблизи максимума можно оценить эффективный диаметр светового пятна $d \sim 130$ мкм.

Температурные характеристики ФЭ сенсора давления нуждаются в специальном рассмотрении, что связано с иным назначением таких структур по сравнению с солнечными элементами и обычными фотодиодами.

На рис. 6 представлена температурная зависимость тока короткого замыкания $I_{\kappa_3} = f(T)$ еди-





Fig. 5. Transforming PE characteristic in a normalized form (see explanations in the text)



Рис. 6. Температурная зависимость тока короткого замыкания одиночного фотодиода при управляющем токе лазерного диода $I_{\rm лаз}=30~{\rm MA}$

Fig. 6. Themperature dependence of the short circuit current of a single photodiode at control current of the laser diode $I_{Aa3} = 30 \text{ mA}$

ничного фотодиода в рассматриваемой структуре. Она может быть аппроксимирована линейной зависимостью

$$I_{\rm K3}(T) = I_{\rm K3}(T_0)[1 + \alpha_I(T - T_0)],$$

где T_0 — комнатная температура; α_I — температурный коэффициент тока.

Температурный коэффициент тока короткого замыкания для разработанного фотодиода равен $\alpha_{I_{K3}} = 0,0014$ /°C. Увеличение I_{K3} с повышением температуры связано с уменьшением ширины запрещенной зоны кремния при нагреве [12]. Это увеличение приводит к возрастанию величины начального разбаланса фотодиодной структуры, повышению чувствительности S_z и общей чувствительности S фотоэлектрического сенсора давления. Температурная зависимость чувствительности примерно равна по величине, но противоположна по знаку температурной зависимости чувствительности тензорезистивных сенсоров.

Экспериментальное значение $\alpha_{I_{K3}}$ оказывается в 2,3 раза больше значения, предсказанного теорией идеального фотодиода ($\alpha_{I_{K3}} \approx 0,0006/^{\circ}$ С), что, по-видимому, связано с большим влиянием последовательного сопротивления и шунтирующего сопротивления из-за неполной засветки площади фотодиода световым пятном [11, 12]. Возможным путем к уменьшению $\alpha_{I_{K3}}$ является оптимизация топологических и технологических параметров фотодиодов.

Температурная зависимость напряжения холостого хода $U_{xx} = f(T)$ фотодиодов аппроксимируется выражением

$$U_{\rm xx}(T) = U_{\rm xx}(T_0) - k(T - T_0),$$



Рис. 7. Температурная зависимость обратного темнового тока фотодиода в логарифмическом масштабе при обратном смещении $U_{\rm oбp}=1~{
m B}$

Fig. 7. Temperature dependence of the reverse dark photodiode current in a logarithmic scale at a reverse bias $U_{obp} = 1 V$

где $U_{xx}(T_0) = 450 \text{ мВ}$ при полной засветке фотоди-

ода при комнатной температуре, $k \approx -2.2 \text{ мB} \cdot ^{\circ}\text{C}^{-1}$. Значение температурного коэффициента k согласуется с теоретическим значением для прямосмещенного диода [14]. Температурный коэффициент напряжения холостого хода $\alpha_{U_{xx}}$ существенно отличается по величине от α_I и имеет отрицательный знак $\alpha_{U_{xy}} = -0,0052/^{\circ}\text{C}$.

Темновой ток фотодиодов влияет на все характеристики фотоэлектрического сенсора давления. Близкое расположение фотодиодов на кристалле и интегральная технология обусловили то, что характеристики фотодиодов почти идентичны, и это позволяет улучшить метрологические характеристики сенсора за счет компенсации токов. Температурная зависимость обратного темнового тока $I_0(T)$, приведенная на рис. 7, хорошо аппроксимируется соотношением

$$I_0(T) = I_0(T_0) \exp[\alpha_{I0}(T - T_0)]$$

где $\alpha_{I0} = 0,061/^{\circ}$ С, что соответствует данным работы [14]. Обратный темновой ток зависит от физико-технологических особенностей фотодиодов и в рассматриваемом случае равен $I_0(T_0) = 4 \times 10^{-10}$ А. Фоточувствительный элемент сохраняет работо-способность до температуры 120 °С.

Заключение

Разработан, изготовдлен и исследован фоточувствительный элемент для сенсора давления с модуляцией светового потока, содержащий пару планарных кремниевых фотодиодов. Дифференциальное включение фотодиодов позволяет использовать линейный участок преобразовательной характеристики сенсора по сравнению с сенсором, описанным в статье [5], имеющим одиночный фотодиод. Для сенсора давления более предпочтительным является режим измерения разности токов короткого замыкания из-за их более слабой температурной зависимости по сравнению с напряжением холостого хода. Увеличение температуры приводит к повышению чувствительности сенсора давления с модуляцией светового потока, в противоположность сенсорам на тензорезистивном эффекте. Разработанные планарные кремниевые фотодиоды имеют температурный коэффициент тока короткого замыкания вдвое выше теоретического значения для идеального диода, учитывающего только температурное изменение ширины запрещенной зоны кремния.

Авторы выражают благодарность Гридчиной Евгении Петровне за помощь в профилировании фоточувствительного элемента.

Список литературы

1. Hök B., Tenerz L., Gustafsson K. Fibre-optic sensors: A micro-mechanical approach // Sensors and Actuators. 1989. Vol. 17, Iss. 1–2. P. 157–166.

2. **Gustafsson K., Hök B.** A fibre optic pressure sensor in silicon based on fluorescence decay // Sensors and Actuators. 1989. Vol. 19, Iss. 4. P. 327–332.

3. Бонцаенко В. Е., Виговская Т. В., Кокин Е. П., Смирнов А. А., Сурин Ю. В. Интегральный преобразователь давления. Патент РФ № 2186438, кл. Н01L29/84, приоритет от 21.06.2001.

4. Середников Д. И., Мурашкина Т. И. Волоконно-оптический сигнализатор уровня жидкости. Патент РФ № 2297602, МПК J01F23/22 от 20.04.2007.

5. Dziuban J. A., Gorecka-Drzazga A., Lipowicz U. Silicon optical pressure sensor // Sensors and Actuators A. 1992. Vol. 32. P. 628–631.

6. **Dziuban J. A.** Bonding in microsystem technology. Springer Netherlands, 2006. 349 p.

7. Бусурин В. Н., Носов Ю. Р. Волоконно-оптические датчики: физические основы, вопросы расчета и применение. М.: Энергоатомиздат, 1990. 254 с.

8. Zheng W., Cao N., Qian J. High-sensitivity photoelectric pressure sensor based on a monolithic dual photodiode // Proc. SPIE 2894, Detectors, Focal Plane Arrays, and Applications, 1996. P. 26–33.

9. Гридчин В. А., Васильев В. Ю., Чебанов М. А., Бялик А. Д., Чернов А. С. Численное моделирование элементов фотоэлектрического волоконно-оптического сенсора давления // Нано- и микросистемная техника. 2014. № 6. С. 3—7.

10. Чернов А. С., Чебанов М. А., Гридчин В. А., Васильев В. Ю. Исследование закономерностей формирования 3D островковых структур Si (100) при травлении в водном растворе КОН // Нано- и микросистемная техника. 2015. № 9. С. 34—40.

11. **Зи С.** Физика полупроводниковых приборов. М.: Мир, 1984. Т. 2. 455 с.

12. **Honsberg C., Bowden S.** Photovoltaic Education Network. URL: http://pveducation.org/pvcdrom/solar-cell-operation/ effect-of-temperature

13. Аш Ж., Андре П., Бофрон Ж. и др. Датчики измерительных систем. М.: Мир, 1992. 412 с.

14. Степаненко И. П. Основы теории транзисторов и транзисторных схем. М.: Госэнергоиздат, 1985. 367 с.

A. S. Chernov¹, Engineer, chernov@sib-is.ru, A. L. Samorodov¹, Principal Engineer,
 S. P. Khabarov², Senior Lecturer, V. A. Gridchin², D. Sc., Professor,

¹ SibIS LLC (Novosibirsk)

² Novosibirsk State Technical University

Photosensitive Element for a Pressure Sensor with the Optical Spatial Modulation

The article presents the results of investigation of a photosensitive element comprising two planar photodiodes of a pressure sensor with the optical spatial modulation. The temperature dependences of the short-circuit currents and the reverse currents of the photodiodes were investigated. The authors considered the transforming characteristic features of the sensor with two photodiodes in a differential mode. Feasibility of linearization of the sensor output signal was shown. The short circuit current temperature coefficient of the designed photodiodes was equal to $\alpha_{Isc} = 0,0014/^{\circ}C$. The authors demonstrated an increase of the sensitivity of the pressure sensor with the optical spatial modulation due to raising of temperature.

Keywords: photosensitive element, optical fiber, photoelectric pressure sensor, planar CMOS photodiodes

Introduction

Measurement of pressure in aggressive, fire- and explosive-dangerous environments is a topical problem. A search for rational solutions is conducted at the level of design and at the level of the principles of transformation. Alongside with the tensoresistive, capacitive, piezoelectric and resonant sensors, the optical and optoelectronic pressure sensors are applied with the use of microsystem technologies [1-7].

The microsystem technology is realized most fully in the pressure sensor, in which the optical fiber displacement is transformed into a change of a light flux of a photo diode working in the photovaltaic mode [5, 6]. According to classification [8], in such a sensor the spatial optical modulation is realized. Application of the microsystem technology ensures smaller dimensions, adjustment of the design's nodes, and control of the sensor's transforming characteristics. For example, the transforming characteristic of a pressure sensor with one photodiode [5, 6] has a nonlinear character, however, it can be transformed into a quasilinear one, if two photodiodes are used [9]. Obviously, in literature the questions of designing, selection of a rational design, experimental research of the photo-electric sensors with application of the microsystem technologies are presented insufficiently.

Previously, in [9, 10] a numerical modeling of an elastic element of a pressure sensor with a fiber-optical light emitter was carried out. Also the specific formation features of an elastic element of a complex form investigated during the anisotropic etching were investigated. In the paper a design and experimental characteristics of a photosensitive element of such a sensoris presented.

Structure of a photo-electric sensor

A general view of a laboratory sample of sensor is presented on Fig. 1. Its basic parts are the following:

Elastic element 1 (EE), which is a silicon chip with a flat diaphragm on the reverse side and profiled face comprising a rigid centre with a V-groove for placing the optical fiber, and parallel V-grooves on the frame of the membrane, intended for adjustment of the sensor design;

- Optical fiber 2 fixed on the rigid centre and frame of the elastic element;
- Photo-sensitive element 3 (hereinafter PE) asilicon chip comprising two independent planar photodiodes, separated by a narrow interval, and special through adjustment apertures (fig. 2).

The optical fiber and EE form an optomechanical part for transformation of the external gauge pressure into movement of the light beam exiting the optical fiber. In the considered sensor the scheme of transformation of the measured influence looks like:

$$P \to w \to y \to z$$
,

where P - is pressure, w and y - displacement of the rigid centre and of the light spot in relation to the photodiodes, z - differential output signal. Sensitivity of sensor S is determined by the following expression:

$$S = \frac{\partial z}{\partial P} = \frac{\partial z}{\partial y} \cdot \frac{\partial y}{\partial w} \cdot \frac{\partial w}{\partial P} = S_z S_y S_w,$$

where S_{z} , S_{y} , S_{w} – are the corresponding sensitivities, which can be independently controlled for achievement of the maximal values.

A specific feature of the sensor is the orthogonal arrangement of the planes of the optomechanical part and PE. Such a configuration allows us to simplify the manufacture of the sensor's parts and it naturally takes into account the functional division between them, which topologically can be realized in various ways.

Adjustment of PE in relation to the optomechanical part is realized by means of microguides, located in additional V-grooves of the optomechanical part and apertures in the chip with the photodiodes. The mutual position of PE and of the optomechanical part is fixed by a glue, which does not bear any mechanical load.

An assembled sensor is electrostatically connected with a glass basis, glued into the standard TO-8 package.

Photosensitive element

PE chip with the external dimensions of $4 \times 2,5 \times$ $\times 0,3$ mm is formed on a double-sided polished n-Si wafers, and contains two isolated photodiodes, made by standard CMOS technologies. The photodiodes have the sizes of 500×315 micrometers in the base area and 449×264 micrometers in emitter area, which allows compensating a possible deviation of a light beam from the central position. Such dimensions allow operation with a light spot up to 240 micrometers in diameter and maximum spot displacement up to 70 micrometers, as shown in the article [10]. The layout distance between the diodes is 20 micrometers (fig. 3).

The photodiodes were formed by ion implantation with the subsequent thermal processing and had nemitter area with depth of ~0,9 micrometers and the surface resistance of $\rho_s = 27$ Ohm/kV; and the base with depth of ~6 micrometers and the surface resistance of $\rho_s = 1200$ Ohm/kV. There are five contacts on the planar side of PE chip, four of them are connected to the photodiodes and one is to the substrate. Besides that, there is a test structure for the layers electric parameters controlformed on the chip.

For adjustment of the PE chip respective to the center of the radiating optical fiber, fixed on the rigid centre of the optomechanical part, two apertures were formed in the chip with diameters close to the adjustment optical fibers placed in V-grooves on the frame of the elastic element of the optomechanical part. The apertures were formed by a combined anisotropic etching of the non-planar side and by isotropic plasma-chemical etching of the planar side of the wafer. The anisotropic etching was done in 33 % water solution of KOH to a depth of 265 μ m, and the plasma-chemical etching was done to a depth of ~40 μ m, which allowed to make apertures with the size of 130 ± 5 μ m.

Electric circuit of measurements and the experiment

An experimental research of the PE was carried out with the use of the electronic unit, the circuit is presented in fig. 4. Light beam to the photodiodes was supplied from the pigtailed fiber-optical laser diode WSLP-635-005m-M-PD, power up to 5 mW and wavelength of 635 nm, the free end of which was orthogonally directed to the PE chip surface. The photodiodes worked in a short circuit mode and generated a photocurrent proportional to the light flux. The differential connection of the photodiodes allowed to receive directly the difference of the photocurrents, proportional to the displacement of the light spot in relation to the central point between the photodiodes. At a symmetric illumination, i.e., when the light spot was in the central point between the photodiodes, the difference of the photocurrents was equal to zero.

The signal amplifier (SA) on operational amplifier AD852 transformed the photocurrent into voltage within the limits of ± 20 mV and displaced the middle point to the positive area by the value of the reference voltage. Further, the resulting signal was sent to the AD7297 ADC input,, which formed a 24 digital code proportional to the input signal. The digital code via the serial peripherial interface SPI was transmitted to the ATMega16U4 microcontroller and then via USB to the computer for storing and displaying the information. By commands from the computer the same microcontroller controlled the operating modes of the current source of the laser diode and ADC. The temperature sensor to control and stabilize the current source was included in the electric circuit.

The dependence of the output signal z(y) of PE on displacement of a light spot in direction, perpendicular to the section lines between the two photodiodes, was studied. Under z(y) is meant the output signal displayed on the screen of the personal computer after digital processing. This dependence represents particular transforming characteristic Z = z(y), to which sensitivity S_{τ} corresponds. The operation of PE as a part of a sensor was simulated in the experiment by displacement of optical fiber y directed by a normal to the photodiodes surface by means of a micrometric device for positioning of the light beam with a step of 10 micrometers at temperature T = 293 K. The temperature dependences of the short circuit current and the reverse dark currents of the PE photodiodes were measured within the interval of 293...413 °K in TEREHY Co. UC - 20CE heat chamber at a fixed position of the light spot and constant illumination.

Experimental results and discussion

The transforming characteristic of PE $Z = z(y) = \Delta I_{sc}(y)/R_{nf}$, received with the use of micrometric positioning, normalized on Z_{max} , is presented in fig. 5, where $Z_{max} = \Delta I_{sc} \max/R_{nf}$, $R_{nf} = 100 \text{ k}\Omega$ (R_{nf} – is resistance of the negative feedback). Displacement of the light spot is given in y/d units, where $d = 62,5 \mu \text{m}$ – the diameter of the core of the optical fiber. The maximum difference of the short circuit currents at a full illumination of one of the two photodiodes at a control current of the laser diode of 30 mA is equal to $\Delta I_{sc} \max = 0,7 \mu \text{A}$. $\Delta I_{sc} \max$ is proportional to the illumination of the photodiodes, and can be increased if reqired.

The transforming characteristic is symmetric in relation to the sign of the displacement and is presented for z(y) > 0. The initial region of the characteristic at 0 < y/d < 0.8 is linear and can be used for measurements. The flat maximum close to $y/d \sim 2.7$ indicates a non-uniform distribution of energy within the light spot and blur of its borders. Reduction of PE signal on the interval e/d > 4 is associated with the movement of the light spot beyond the border of the photodiode. The effective diameter of the light spot can be estimated by the width of the flat region of the characteristic.

The temperature characteristics of PE of the pressure sensor require special consideration, due to different purposes of such structures in comparison with the solar elements and regular photodiodes. The temperature dependence of the short circuit current $I_{sc} = f(T)$ of a single photodiode in the structure is presented on Fig. 6. It can be approximated by the following linear equation:

$$I_{sc}(T) = I_{sc}(T_0)[1 + \alpha_I(T - T_0)],$$

where T_0 — is a room temperature; α_I — current temperature coefficient.

The temperature coefficient of the short circuit current for a photodiode is equal to $\alpha_{Isc} = 0,0014/^{\circ}$ C. Increase of I_{sc} with a raise of temperature is connected with reduction of the width of the bandgap of silicon during heating [12]. This leads to an increase of the initial disbalance of the photodiode structures and an increase of sensitivity S_z and general sensitivity S of the photo-electric pressure sensor. The temperature dependence of the sensitivity is approximately equal by the value, but is opposite by the sign to the temperature dependence of sensitivity of the tensoresistive sensors.

Experimental value α_{Isc} is 2,3 times more than the value foretold by the theory of the ideal photodiode $(\alpha_{Isc} \approx 0,0006/^{\circ})$, which is probably connected with a great influence of the serial resistance and shunting resistance because of an incomplete area illumination of the photodiode by a light spot [11, 12]. A possible way to reduce the value of α_{Isc} is optimization of the layout and technological parameters of the photodiodes.

The temperature dependence of the open circuit voltage $U_{oc} = f(T)$ of the photodiodes is approximated by the following expression:

$$U_{oc}(T) = U_{oc}(T_0) - k(T - T_0),$$

where $U_{oc}(T_0) = 450 \text{ mV}$ at a full illumination of a photodiode at a room temperature, $k \approx -2.2 \text{ mV} \cdot {}^{\circ}\text{C}^{-1}$. The value of the temperature coefficient *k* corresponds to the theoretical value for a forward-biased diode [14]. The temperature coefficient of the open circuit voltage α_U essentially differs from α_{Isc} and has a negative sign $\alpha_{Uoc} = -0.0052/{}^{\circ}\text{C}$.

The characteristics of a photo-electric pressure sensor is influenced by the dark current of the photodiodes. Due to a close arrangement of the photodiodes on a chip and integrated technology the characteristics of the photodiodes are almost identical. It allows to improve the metrological characteristics of a sensor due to the currents compensation. The temperature dependence of the reverse dark current $I_0(T)$ is presented in fig. 7, is well approximated by the following expression:

$$I_0(T) = I_0(T_0) \exp[\alpha_{I0}(T - T_0)],$$

where $\alpha_{I0} = 0.061/^{\circ}$ C, which corresponds to the data [14]. The reverse dark current depends on the physicaltechnological features of the photodiodes and in the considered case is equal to $I_0(T_0) = 4 \cdot 10^{-10}$ A. The photosensitive element preserves its operability at temperatures up to 120 °C.

Conclusion

A photosensitive element for a pressure sensor with modulation of the light flux, and containing a pair of planar silicon photodiodes was developed and investigated. The differential connection of the photodiodes allows to use the linear region of the transforming characteristic of a sensor in comparison with a sensor described in [5], having a single photodiode. For a pressure sensor the mode of measurement of a difference of the short circuit currents is more preferable, because of their weaker temperature dependence in comparison with the open circuit voltage. Increase of the temperature results in a higher sensitivity of the pressure sensor with light flux modulation, unlike that of the sensors based on the tensoresistive effect. The developed planar silicon photodiodes have the temperature coefficient of the short circuit current twice higher than the theoretical value for an ideal diode taking into account only the temperature change of the width of the silicon bandgap.

The authors express their gratitude to Evgeniya Petrovna Gridchina for her assistance in profiling of the photosensitive element.

References

1. Hök B., Tenerz L., Gustafsson K. Fibre-optic sensors: A micro-mechanical approach, *Sensors and Actuators*, 1989, vol. 17, Iss. 1–2, pp. 157–166.

vol. 17, Iss. 1–2, pp. 157–166.
2. Gustafsson K., Hök B. A fibre optic pressure sensor in silicon based on fluorescence decay, *Sensors and Actuators*, 1989, vol. 19, Iss. 4, p. 327–332.

3. Boncaenko V. E., Vigovskaja T. V., Kokin E. P., Smirnov A. A., Surin Ju.V. Integral'nyj preobrazovatel' davlenija. Patent RF \mathbb{N} 2186438, kl. H01L29/84, prioritet ot 21.06.2001.

4. Serednikov D. I., Murashkina T. I. Volokonno-opticheskij signalizato rurovnja zhidkosti. Patent RF № 2297602, MPK J01F23/22 ot 20.04.2007.

5. Dziuban J. A., Gorecka-Drzazga A., Lipowicz U. Silicon optical pressure sensor, *Sensors and Actuators A.*, 1992, vol. 32, pp. 628–631.

6. Dziuban J. A. Bonding in microsystem technology, Springer Netherlands, 2006, 349 p.

7. Busurin V. N., Nosov Ju. R. Volokonno-opticheskie datchiki: fizicheskie osnovy, voprosy rascheta i primenenie, Moscow, Jenergoatomizdat, 1990, 254 str.

8. Zheng W., Cao N., Qian J. High-sensitivity photoelectric pressure sensor based on a monolithic dual photodiode, *Proc. SPIE 2894, Detectors, FocalPlaneArrays, andApplications*, 1996, pp. 26–33.

9. Gridchin V. A., Vasil'ev V. Yu., Chebanov M. A., Bjalik A. D., Chernov A. S. Chislennoe modelirovanie jelementov fotojelektricheskogo volokonno-opticheskogo sensora davlenija, *Nano- i mikrosistemnaja tehnika*, 2014, no. 6, pp. 3–7.

10. Chernov A. S., Chebanov M. A., Gridchin V. A., Vasil'ev V. Yu. Issledovanie zakonomernostej formirovanija 3D ostrovkovyh struktur Si (100) pri travlenii v vodnom rastvore KON, *Nano- i mikrosistemnaja tehnika*, 2015, no. 9, pp. 34–40.

11. Zhi S. Fizika poluprovodnikovyh priborov, Moscow, Mir, 1984, vol. 2, 455 p.

12. **Honsberg C., Bowden S.** *Photovoltaic Education Network*, URL: http://pveducation.org/pvcdrom/solar-cell-operation/effect-of-temperature

13. Ash Zh., Andre P., Bofron Zh. i dr., Datchiki izmeritel'nyh sistem, Moscow, Mir, 1992, 480 p.

14. Stepanenko I. P. Osnovy teorii tranzistorov i tranzistornyh shem. Moscow, Gosjenergoizdat, 1985, 367 p.

К. Е. Блум, инженер-конструктор, e-mail: blum@sib-is.ru, ООО "СибИС", Новосибирск, Россия **Д. И. Остертак**, канд. техн. наук, доц., e-mail: ostertak@ngs.ru, Новосибирский государственный технический университет, Новосибирск, Россия

РАСЧЕТ ЕМКОСТИ ГРЕБЕНЧАТОГО ПЕРЕМЕННОГО КОНДЕНСАТОРА ДЛЯ ЭЛЕКТРОСТАТИЧЕСКОГО ВИБРАЦИОННОГО ГЕНЕРАТОРА ЭНЕРГИИ С УЧЕТОМ КРАЕВЫХ ЭФФЕКТОВ

Поступила в редакцию 04.04.2016 г.

Рассматривается гребенчатая 3D-конструкция переменного конденсатора с изменением площади перекрытия электродов, где подвижный и неподвижный электроды расположены в различных плоскостях, при этом движение подвижного электрода происходит в латеральном направлении. Исследуется возможность увеличения глубины модуляции емкости конденсатора путем изменения размеров его электродов. Показано, что существует оптимальная ширина пальцев электродов w, при которой можно достичь наибольшего отношения C_{max}/C_{min}. Исследовано влияние межэлектродного зазора g и числа пальцев электродов N на электрическую емкость. Результаты работы позволяют найти наиболее оптимальную конструкцию исследуемого гребенчатого переменного конденсатора.

Ключевые слова: гребенчатый переменный конденсатор, электростатический вибрационный генератор энергии, МЭМС, МЭМП энергии, краевые эффекты

Введение

Благодаря достижениям в микроэлектронике, радиотехнике и микросистемной технике сегодня стремительно развиваются беспроводные сенсорные сети (БСС), которые состоят из большого числа интеллектуальных сенсоров с низким энергопотреблением, информация от которых собирается и передается с помощью радиоканала [1]. Многие отрасли и сферы деятельности (промышленность, транспорт, коммунальное хозяйство, охрана, медицина) заинтересованы во внедрении БСС, при этом число потребителей непрерывно увеличивается.

Для функционирования БСС необходимы надежные автономные источники питания. В настоящий момент основными источниками питания для узлов сети являются малогабаритные батареи и аккумуляторы, требующие периодической замены или подзарядки, что не всегда возможно из-за труднодоступности элементов БСС и их большого числа. Кроме того, при функционировании БСС ее элементы находятся в состоянии ожидания (очень низкого потребления энергии) до 99 % всего времени эксплуатации. Поэтому возможна ситуация, когда саморазряд батареи будет превышать среднее потребление энергии элементом БСС.

Наиболее подходящей альтернативой батареям и аккумуляторам являются источники питания, позволяющие извлекать энергию из окружающей среды непосредственно на месте функционирования элементов БСС [2]. Такие источники содержат устройство, преобразующее энергию окружающей среды в электрическую энергию (преобразователь энергии), и компактную перезаряжаемую батарею, которая служит буферным элементом для поддержания непрерывной работы системы [3].

Источниками энергии могут быть солнечный свет, потоки жидкостей и газов, перепады давления и температуры, радиоактивное излучение и энергия механических колебаний и вибраций [2]. Ввиду распространенности и доступности источников механической энергии, наиболее подходящим представляется использование микроэлектромеханических преобразователей (МЭМП) механической энергии в электрическую энергию, которые фактически являются микроэлектромеханическими системами (МЭМС) [4]. Существуют три основных направления разработки МЭМП энергии — на основе пьезоэлектрических, электромагнитных и электростатических преобразователей [5]. С технологической точки зрения более перспективными считаются электростатические (емкостные) МЭМП, так как технология их изготовления полностью совместима с технологией интегральных микросхем.

Принцип работы и постановка задачи

Принцип работы электростатических МЭМП энергии, обеспечивающих преобразование энергии механических колебаний в электрическую энергию, основан на изменении заряда или напряжения на обкладках переменного конденсатора (рис. 1) при модуляции его емкости с помощью механических колебаний. За счет работы, совершаемой внешней механической силой, при изменении емкости переменного конденсатора часть механической энергии преобразуется в электрическую энергию.

На рис. 2 представлена электрическая схема МЭМП (генератора) энергии, где V_0 — первичный источник напряжения, C — переменный конден-



Рис. 1. Упрощенная схема механического узла МЭМП Fig. 1. Simplified scheme of the MEMC mechanical unit

сатор, C_S — накопительный конденсатор, R — сопротивление нагрузки, Sw_1 и Sw_2 — управляющие ключи. Под действием внешней механической силы емкость переменного конденсатора может изменяться от C_{\min} до C_{\max} и обратно.

Если в момент достижения максимальной емкости конденсатор подключить к основному источнику напряжения (замкнув ключ Sw_1), то через небольшой интервал времени напряжение на конденсаторе достигнет V_0 , а запасенная энергия значения $W_{Cmin} = C_{max}V_0^2/2$. При этом на этапе заряда конденсатора от основного источника будут взяты энергия $W_0 = C_{max}V_0^2$ и заряд $\Delta Q = C_{max}V_0$. Преобразование механической энергии в элек-

Преобразование механической энергии в электрическую в данной схеме будет иметь место при уменьшении емкости конденсатора от C_{\max} до C_{\min} (при разомкнутых Sw_1 и Sw_2) за счет внешней механической силы.

Если теперь в момент достижения минимальной емкости конденсатор C подключить (замыканием ключа Sw_2) к нагрузке, то энергия $W_{Cmax} = (C_{max}/C_{min})W_{Cmin}$, накопленная к концу цикла преобразования, может быть передана в нагрузку. После этого при разомкнутом ключе Sw_2 за счет внешней силы и/или возвращающей силы упругого подвеса подвижного электрода емкость конденсатора должна быть увеличена до C_{max} . На этом цикл преобразования заканчивается.

Зачастую параллельно нагрузке включают накопительный конденсатор C_S , как показано на рис. 2 пунктиром. В результате при каждом замыкании ключа Sw_2 (в конце каждого цикла преобразования) часть заряда переменного конденсатора C переходит в C_S , а затем (уже при разомкнутом Sw_2) стекает в нагрузку R.

При циклическом механическом воздействии разность энергии, переданной в нагрузку за цикл преобразования на этапе разряда конденсатора, и

энергии, взятой от основного источника на этапе заряда, равна

$$\Delta W = W_{\text{Cmax}} - W_0 = \frac{1}{2} V_0^2 \gamma, \quad (1)$$

где $\gamma = (C_{\text{max}} - 2C_{\text{min}})(C_{\text{max}}/C_{\text{min}}).$ Из выражения (1) видно, что

из выражения (1) видно, что вырабатываемая за цикл энергия зависит от величины γ , а энергия, отдаваемая в нагрузку, будет превышать энергию, взятую из основного источника, только если $C_{\text{max}}/C_{\text{min}} > 2$.

Для эффективной работы преобразователя необходимо иметь максимальную глубину модуляции емкости C_{max}/C_{min} . Изменения емкости конденсатора МЭМП можно добиться путем изменения

межэлектродного зазора или площади перекрытия электродов (см. рис. 1). Оба варианта, однако, имеют свои недостатки: конструкции с изменением межэлектродного зазора подвержены эффекту схлопывания (pull-in effect) электродов [6], тогда как в конструкциях с изменением площади перекрытия электродов модуляция емкости $C_{\rm max}/C_{\rm min}$ может быть недостаточной для эффективной работы генератора из-за влияния краевых эффектов [7, 8].

В данной работе рассматривается гребенчатая конструкция переменного конденсатора с изменением площади перекрытия электродов, где подвижный и неподвижный электроды расположены в различных плоскостях, при этом движение подвижного электрода происходит в горизонтальном направлении (рис. 3) [9]. Такая конструкция не подвержена эффекту схлопывания из-за отсутствия движения в вертикальном направлении, вдобавок площадь перекрытия между электродами изменяется больше, чем в конструкции с электродами в одной плоскости (см. рис. 1), что обеспечивает бо́льшую модуляцию емкости C_{max}/C_{min} [10]. Дополнительным преимуществом данной 3D-конструкции является возможность комбини-



Fig. 2. Electric circuit of MEMC of energy



Рис. 3. Модель исследуемого гребенчатого переменного конденсатора: *1* — подвижный гребенчатый электрод; *2* — неподвижный гребенчатый электрод; *3* — основание неподвижного электрода; основание подвижного (верхнего) электрода на рисунке не показано

Fig. 3. Model of the comb variable capacitor: 1 - moveable comb electrode; 2 - fixed comb electrode; 3 - base of the fixed electrode; the base of the moveable (upper) electrode is not shown

рования нескольких переменных конденсаторов в перпендикулярном к плоскости устройства направлении, которая позволит повысить вырабатываемую энергию при малом изменении размеров устройства. Стоит заметить, что в литературе мало рассматривается предложенная конструкция из-за сложности расчета электрической емкости, обусловленной специфической конфигурацией электрических полей с сильным влиянием краевых эффектов.

Целью работы является исследование возможности увеличения глубины модуляции емкости $C_{\rm max}/C_{\rm min}$ гребенчатого переменного конденсатора путем изменения размеров его электродов.

Модель

Рассматриваемый переменный конденсатор изображен на рис. 3, модуляция емкости в нем происходит за счет изменения площади перекрытия между металлическими гребенчатыми электродами при смещении *х* подвижного электрода *1*, относительно неподвижного электрода *2*. Электроды *1* и *2* имеют одни и те же размеры, расположены в параллельных плоскостях, состоят каждый из 13 соединенных друг с другом пальцев и закреплены на диэлектрических основаниях.

Расчет зависимостей емкости C от смещения подвижного электрода x относительно неподвижного проводился с помощью метода конечных элементов в пакете ANSYS с погрешностью не более 3 %. В областях с резким пространственным изменением поля плотность сетки была значительно выше, чем в остальных областях. В качестве граничных условий задавалась воздушная окружающая среда и напряжение на подвижном и стационарном электродах — 1 В и 0 В соответственно.

Вычисления проводились при различных значениях ширины пальцев w и толщины электродов t, длина пальцев l = 46 мм и межэлектродный зазор g = 0,1 мм оставались неизменными. Изменение емкости происходило при смещении *х* подвижного электрода относительно начального положения электродов, когда они расположены друг над другом. Смещение *х* варьировалось от 0 мм до 2,2 мм с шагом 0,1 мм. Ширина *w* и толщина *t* пальцев изменялись от 0,2 мм до 2 мм с шагом 0,2 мм, положения центров пальцев не изменялись. Расстояние между соседними пальцами составляло d = 4 - w, полная ширина каждого из электродов определялась как W = 50 - (2 - w), где все величины берутся в миллиметрах.

Результаты расчетов и обсуждение

На рис. 4, *а* представлены зависимости емкости *С* переменного конденсатора от относительного смещения *х* подвижного электрода при различной ширине пальцев *w* для толщины подвижного и неподвижного электродов t = 0.8 мм.

Из рис. 4, *а* видно, что на всех зависимостях C(x) емкость имеет наибольшее значение, когда x = 0 мм, при этом все пальцы верхнего и нижнего электродов расположены строго друг над другом и площадь перекрытия электродов максимальна (рис. 5, *a*, см. четвертую сторону обложки).

При смещении подвижного электрода x > 0 мм емкость С падает из-за того, что площадь перекрытия между пальцами подвижного и неподвижного электродов уменьшается (рис. 5, b, см. четвертую сторону обложки). Однако емкость уменьшается до x = 2 мм, после чего начинает снова расти, при этом возникает минимум из-за того, что перекрытие между электродами полностью отсутствует (рис. 5, с, см. четвертую сторону обложки). В общем случае периодичность максимумов емкости соответствуют смещению x = n(w + d), а минимумов — $x = n(n \pm 1/2)(w + d)$, где $n \in \mathbb{Z}$. Очевидно, что значения емкости в максимумах и минимумах будут уменьшаться с ростом *n*, это обусловлено уменьшением рабочей площади перекрытия электродов переменного конденсатора.

Из рис. 4, *а* также видно, что с уменьшением ширины электродов *w* максимальная емкость C_{max} (при x = 0 мм) и минимальная емкость C_{\min} (при x = 2 мм) уменьшаются. Уменьшение максимальной емкости C_{\max} обусловлено уменьшением площади электродов и, следовательно, уменьшением максимального перекрытия между электродами. Уменьшение C_{\min} с уменьшением *w* возникает изза увеличения расстояния между пальцами *d*, что приводит к снижению влияния одного электрода на другой при x = 2 мм (рис. 5, *c*).

На рис. 4, b представлены нормированные зависимости емкости C_{\max}/C от относительного





Fig. 4. Dependencies of capacitance C on the relative displacement x at different widths of the fingers w and thickness of the electrodes t = 0.8 mm: a — absolute values of the capacitance; b — normalized values of the capacitance at different ratios of w/g

смещения x/[0,5(w + d)] для различных отношений w/g. Наименьшее значение C_{max}/C_{min} (при x/[0,5(w + d)] = 1) наблюдается для w/g = 2, затем оно растет и достигает максимального значения при w/g = 14, после чего снова уменьшается для w/g = 20. Таким образом, существует оптимальная ширина пальцев электродов w, при которой можно достичь наибольшего отношения C_{max}/C_{min} .

На рис. 6 представлены нормированные зависимости емкости C_{\max}/C от относительного смещения x/[0,5(w + d)] подвижного электрода при различной толщине электродов для ширины пальцев w = 1,4 мм. С ростом толщины электродов tпри неизменной ширине пальцев w отношение C_{\max}/C_{\min} будет увеличиваться за счет краевых эффектов и увеличения боковой поверхности электродов (см. рис. 5). На рис. 7 (см. четвертую сторону обложки) представлен график поверхности для отношения максимальной емкости к минимальной $C_{\rm max}/C_{\rm min}$ от отношений w/g и t/g. Из рисунка видно, что отношение $C_{\rm max}/C_{\rm min}$ имеет максимум при w/g = 14 и t/g = 20 и составляет 3,73. Анализ показывает, что отношение $C_{\rm max}/C_{\rm min}$, достигнув максимума при t/g = 20, выходит на насыщение и затем практически не увеличивается.

Интерес также представляет влияние изменения межэлектродного зазора g на электрическую емкость C рассматриваемого переменного конденсатора. На рис. 8 представлены зависимости ем-



Рис. 6. Нормированные зависимости емкости C_{\max}/C от относительного смещения при различных отношениях t/g и ширине пальцев w = 1,4 мм

Fig. 6. Normalized dependencies of the capacitance C_{max}/C on the relative displacement at different ratios of t/g and width of fingers w = 1,4 mm



Рис. 8. Зависимости емкости C от относительного смещения x при различном межэлектродном зазоре g, толщине электродов t = 1,6 мм и ширине пальцев w = 1,4 мм

Fig. 8. Dependence of the capacitance C on the relative displacement x at different values of the interelectrode gap g, thickness of electrodes t = 1,6 mm and width of fingers w = 1,4 mm

427



Рис. 9. Зависимость коэффициента γ от числа пальцев электродов N для конструкции с t = 1,6 мм, w = 1,4 мм и g = 0,1 мм Fig. 9. Dependence of coefficient γ on the number of electrode fingers of N for a design with t = 1,6 mm, w = 1,4 mm and g = 0,1 mm

кости *C* от смещения *x* при различных значениях межэлектродного зазора g = 90, 100 и 110 мкм, при фиксированных значениях w = 1,4 мм и t = 1,6 мм. Установлено, что при изменении зазора g на ± 10 % максимальная емкость $C_{\rm max}$ изменяется не более чем на 8,5 %, минимальная емкость $C_{\rm min}$ — не более 1 %, а отношение $C_{\rm max}/C_{\rm min}$ — не более 7,4 %. То есть при изменении межэлектродного зазора g главным образом изменяется максимальная емкость $C_{\rm max}$, тогда как минимальная $C_{\rm min}$ изменяется ся очень слабо.

Дополнительный интерес представляет исследование влияния числа электродов N на вырабатываемую электростатическим генератором энергию. На рис. 9 представлена зависимость коэффициента γ от числа электродов N, рассчитанная для конструкции гребенчатого переменного конденсатора с шириной пальцев w = 1,4 мм, толщиной электродов t = 1,6 мм и межэлектродным зазором g = 0,1 мм.

Из зависимости на рис. 9 видно, что емкостной коэффициент γ линейно возрастает с ростом числа электродов *N*. Таким образом, выгоднее использовать структуру с бо́льшим числом электродов для получения бо́льшей выходной мощности. В данной работе было выбрано значение N = 13 из-за ограничений на размер конструкции, а следовательно, на число конечных элементов для МКЭ и скорость расчетов.

Заключение

В результате исследования были получены и проанализированы зависимости электрической емкости *C* переменного конденсатора с гребенчатой конструкцией с изменением площади перекрытия электродов от смещения подвижного электрода *х* при различных значениях ширины пальцев *w* и толщины электродов *t*.

Анализ показал следующее:

- полученные зависимости C(x) имеют максимумы емкости при смещении x = n(w + d), а минимумы — при $x = n(n \pm 1/2)(w + d)$, где $n \in \mathbb{Z}$;
- существует оптимальная ширина пальцев w, при которой можно достичь наибольшего отношения C_{max}/C_{min};
- отношение $C_{\text{max}}/C_{\text{min}}$ увеличивается с ростом t/g и выходит на насыщение при $t/g \ge 20$;
- отношение $C_{\text{max}}/C_{\text{min}}$ имеет максимум при w/g = 14, t/g = 20 и составляет 3,73;
- для конструкции с w = 1,4 мм и t = 1,6 мм при изменении зазора g на ± 10 % отношение $C_{\text{max}}/C_{\text{min}}$ изменяется не более чем на 7,4 %;
- для получения бо́льшей выходной мощности необходимо использовать 3D-конструкцию гребенчатого переменного конденсатора с бо́льшим числом электродов *N*.

Результаты работы позволяют более точно рассчитать оптимальную конструкцию представленного гребенчатого переменного конденсатора, используемого в МЭМП энергии.

Список литературы

1. Akyildiz I. F., Su W., Sankarasubramaniam Y., Cayirci E. Wireless sensor networks: a survey // Computer Networks. 2002. Vol. 38. P. 393–422.

2. Ó Mathúna C., O'Donnell T., Martinez-Catala R. V., Rohan J., O'Flynn B. Energy scavenging for long-term deployable wireless sensor networks // Talanta. 2008. Vol. 75. P. 613–623.

3. Torres E. O., Rincon-Mora G. A. Electrostatic Energy-Harvesting and Battery-Charging CMOS System Prototype // Circuits and Systems I: Regular Papers, IEEE Transactions on. 2009. Vol. 56, Iss. 9. P. 1938–1948.

4. Mitcheson P. D., Yeatman E. M., Rao G. K., Holmes A. S., Green T. C. Energy Harvesting From Human and Machine Motion for Wireless Electronic Devices // Proceedings of the IEEE. 2008. Vol. 96, N. 9. P. 1457–1486.

5. **Beeby S. P., Tudor M. J., White N. M.** Energy harvesting vibration sources for microsystems applications // Measurement Science and Technology. 2006. Vol. 17. P. 175–195.

6. Драгунов В. П., Доржиев В. Ю. Начальные условия и динамический pull-in эффект в МЭМС с изменяющимся межэлектродным зазором // Нано- и микросистемная техника. 2015. № 10 (183). С. 31—41.

7. Драгунов В. П., Остертак Д. И. Электростатические взаимодействия в МЭМС со встречно-штыревой структурой // Доклады Академии наук высшей школы Российской Федерации. 2009. № 1 (12). С. 99–106.

8. Драгунов В. П., Колчужин В. А., Остертак Д. И. Влияние краевых эффектов на электрическую емкость в МЭМС // Доклады Академии наук высшей школы Российской Федерации. 2009. № 2 (13). С. 97—105.

9. Basset P., Galayko D., Paracha A. M., Marty F., Dudka A., Bourouina T. A batch-fabricated and electret-free silicon electrostatic vibration energy harvester // Journal of Micromechanics and Microengineering. 2009. Vol. 19, N. 11. P. 115025/1– 115025/12.

10. Блум К. Е., Остертак Д. И. Оптимизация переменного конденсатора гребенчатого типа для микроэлектромеханического преобразователя энергии // Доклады Академии наук высшей школы Российской Федерации. 2015. № 1 (26). С. 20—30.

Capacitance Calculation of the Comb Variable Capacitor for the Electrostatic Vibration Energy Harvester in Consideration of Fringing Field Effects

The topic of the article is a 3D-structure of the comb variable capacitor with a change of electrode overlapping. The capacitor moveable and fixed electrodes are located in different planes, at that, the moveable electrode goes in the lateral direction. Feasibility of an increase of the capacitance modulation depth by changing the capacitor electrode dimensions has been studied. The optimal electrode finger with width w has been demonstrated that the maximal ratio of C_{max}/C_{min} could be reached. The

influence of the interelectrode gap g and the number of electrode fingers N on the capacitance has been studied. The results of the work allow us to develop the optimal design of the considered comb variable capacitor.

Keywords: comb variable capacitor, electrostatic vibration energy harvester, MEMS, microelectromechanical energy converter, fringing field effects

Introduction

Thanks to achievements in microelectronics, radio engineering and microsystem technologies the wireless sensor networks (WSN) is rapidly developing today, which consist of a large number of smart sensors with low energy consumption, the information from which is collected and transmitted by means of a radio channel [1]. Many branches (industry, transport, municipal services, security, medicine) are interested in implementation and application of the WSN, and the number of its consumers increases continuously.

Functioning of WSN demands reliable autonomous power supplies. The main power supplies for the network nodes are small-sized batteries and accumulators requiring periodic replacement or additional charging, which is not always possible because of inaccessibility of the WSN elements and their big number. Besides, during WSN functioning its elements are in a stand-by mode (low energy consumption), which equals to 99 % of all the time of their operation. Therefore, a situation is possible, when a battery self-discharge exceeds the average consumption of energy by a WSN element.

A suitable alternative to the batteries and accumulators are the power supplies, which allow us to generate energy from the environment on the spot of functioning of the WSN elements [2]. Such sources contain a device, converting the energy of the environment into the electric energy (energy converter), and a compact rechargeable battery, which serves as a buffer element for maintenance of the system's continuous operation [3].

Such energy sources can be sunlight, flows of liquids and gases, pressure and temperatures differences, radioactive radiation and energy of mechanical fluctuations and vibrations [2]. In view of availability of the sources of mechanical energy, the most suitable is the use of microelectromechanical converters (MEMC) of the mechanical energy into the electric energy, which are microelectromechanical systems (MEMS) [4]. There are three main directions in development of MEMC energy — on the basis of piezoelectric, electromagnetic and electrostatic converters [5]. From the technological point of view, very promising are the electrostatic (capacitive) MEMC, because the technology for their manufacture is completely compatible with the technology of the integrated microcircuits.

Principle of operation and problem statement

The principle of operation of the electrostatic MEMC of energy, ensuring transformation of the mechanical fluctuations into the electric energy, is based on changing of a charge or voltage on the plate of a variable capacitor (fig. 1) during modulation of its capacitance with mechanical fluctuations. Due to the work done by an external mechanical force, during the change of the capacitance of the variable capacitor, a part of the mechanical energy is transformed into the electric energy.

Fig. 2 presents the electric circuit of MEMC (generator) of energy, where V_0 — is a primary voltage source, C—variable capacitor, C_S — reservoir capacitor, R—load, Sw_1 and Sw_2 — control keys. Under the influence of an external mechanical force the capacitance of the variable capacitor can change from C_{\min} to C_{\max} and back.

If at the moment of achievement of the maximal capacitance we switch the capacitor to the basic voltage source (by closing key Sw_1), then after a small interval of time the voltage on the capacitor will reach V_0 , and the reserved energy will be $W_{\text{Cmin}} = C_{\text{max}} V_0^2/2$. At that, at the stage of the capacitor's charging, the energy of $W_0 = C_{\text{max}} V_0^2$ and charge of $\Delta Q = C_{\text{max}} V_0$ will be taken from the basic source.

Conversion of the mechanical energy into the electric energy in the given circuit will take place with reduction of the capacitance of the capacitor from C_{max} to C_{min} (at open Sw_1 and Sw_2) due to an external force.

If, when the moment of the maximal capacitance is achieved, we switch capacitor C (by closing key Sw_2) to the load, the energy of $W_{\text{Cmin}} = (C_{\text{max}}/C_{\text{min}})W_{\text{Cmin}}$, accumulated by the end of the conversion cycle, can be transferred to the load. After that at an open key of Sw_2 due to the external and/or returning force of the elastic suspension of the moveable electrode the capacitor's capacitance will be increased up to C_{max} . At that, the conversion cycle comes to its end.

Frequently, in parallel to the load, the reservoir capacitor C_S (fig. 2, dotted line) is switched on. As a result, at each closing of the circuit by key Sw_2 (at the end of each cycle of conversion) a part of the charge of the variable capacitor C passes to C_S , and, then (at an open Sw_2) flows down to load R.

In case of a cyclic mechanical influence the difference between the energy, transferred to the load during the cycle of conversion at the stage of discharge of the capacitor, and the energy, taken from the basic source at the charging stage, is equal to

$$\Delta W = W_{Cmin} - W_0 = \frac{1}{2} V_0^2 \gamma, \qquad (1)$$

where $\gamma = (C_{\text{max}} - 2C_{\text{min}})(C_{\text{max}}/C_{\text{min}}).$

From expression (1) it is visible, that the energy generated during the cycle depends on the value of γ , while the energy given to the load, will exceed the energy taken from the basic source, only, if $C_{\text{max}}/C_{\text{min}} > 2$. For effective operation of the converter it is necessary to have the maximal depth of the capacitance modulation $C_{\text{max}}/C_{\text{min}}$. Changes in the capacitance of MEMC capacitor can be achieved by changing the interelectrode gap or the overlapping area of electrodes (fig. 1). Both variants have their drawbacks: the designs with a changing interelectrode gap are subjected to a pull-in effect of the electrodes [6], whereas in the designs with a changing area of the electrode the capacitance modulation of $C_{\text{max}}/C_{\text{min}}$ may be insufficient for an effective work of the generator because of the influence of the fringing field effects [7, 8].

The work describes the comb variable capacitor with a changing overlapping area of the electrodes, where the moveable and fixed electrodes are in different planes, at that, the moveable electrode moves in the horizontal direction (fig. 3) [9]. Such a design is not subjected to the pull-in effect, because of absence of movement in the vertical direction, and the overlapping area between the electrodes changes more than in a design with the electrodes in one plane (see fig. 1), which ensures greater modulation of capacitance $C_{\text{max}}/C_{\text{min}}$ [10]. An additional advantage of the 3D design is a possible combination of several variable capacitors in a direction normal to the device plane, which allows it to generate more energy with a small variation of the dimensions. It is necessary to point out, that the offered design is rarely discussed in literature, because of the complexity of calculation of the electric capacitance, due to a specific configuration of the electric fields with a strong influence of the fringing field effects.

The aim of the work is a study of feasibility of increasing the depth of the capacitance modulation $C_{\text{max}}/C_{\text{min}}$ of the comb variable capacitor by changing the dimensions of its electrodes.

Model

The variable capacitor is presented in fig. 3, the capacitance modulation in it occurs due to the change of the overlapping area between the metal comb electrodes during displacement of x moveable electrode 1, in relation to the fixed electrode 2. Electrodes 1 and 2 are of the same sizes. They are located in parallel planes, consist of 13 interconnected fingers and are fixed on the dielectric bases.

Calculation of the dependences of capacitance C on a displacement of the moveable electrode x in relation to the fixed electrode was done by the method of the final elements in ANSYS with a margin error not more, than 3 %. In the areas with a sharp spatial change of the field, the grid density is considerably higher, than in the other areas. The air environment and voltage on the moveable and stationary electrodes of 1 V and 0 V, correspondingly, were set as the boundary conditions.

The calculations were done with fingers of various widths *w* and thickness of electrodes *t*, the length of fingers l = 46 mm and the interelectrode gap g = 0,1 mm remained invariable. The capacitance change occurred during displacement *x* of the moveable electrode in relation to the initial position of the electrodes, when they were located one over the other. Displacement *x* varied from 0 mm up to 2,2 mm with a step of 0,1 mm. The width *w* and thickness *t* of the fingers varied from 0,2 mm up to 2 mm with a step of 0,2 mm, the positions of the fingers' centers did not change. The distance between the neighboring fingers was d = 4 - w, the full width of each of the electrodes was defined as W = 50 - (2 - w) [mm], where all the values were taken in mm.

Results of calculations and discussion

Fig. 4, *a* presents the dependencies of capacitance *C* of the variable capacitor on the relative displacement *x* of the moveable electrode in case of different widths of fingers *w* for the thicknesses of the moveable and fixed electrodes t = 0.8 mm. It is visible that on dependencies C(x) the capacitance has the greatest value, when x = 0 mm, at that, all the fingers of the upper and lower electrodes are situated strictly one above another, and the overlapping area of the electrodes is maximal (fig. 5, *a*, see 4-th the side of cover).

During displacement of the moveable electrode x > 0 mm the capacitance *C* falls, because the overlapping area between the fingers of the moveable and fixed electrodes decreases (fig. 5, *b*, see 4-th the side of cover). However, the capacitance decreases down to x = 2 mm, after which it grows again, at that, a minimum arises, because there is absolutely no overlap between the electrodes (fig. 5, *c*, see 4-th the side of cover). In general case the periodicity of the maxima of the capacitance corresponds to displacement x = n(w + d), while the minima — to $x = n(n \pm 1/2)(w + d)$, where $n \in \mathbb{Z}$. It is obvious that the capacitance in the maxima and minima will decrease with the growth of *n*, which is determined by the decrease of the working overlapping area of the electrodes of the variable capacitor.

Fig. 4, *a* also shows that with a decrease of the width of the electrodes *w* the maximal capacitance C_{max} (at x = 0 mm) and the minimal capacitance C_{min} (at x = 2 mm) are reduced. Reduction of the maximal capacitance C_{max} is caused by reduction of the area of

the electrodes, and, hence, the reduction of the maximal overlapping between the electrodes. Reduction of C_{\min} with a decrease of w appears because of the growing distance between fingers d, which leads to reduction of the influence of one electrode on the other at x = 2 mm (fig. 5, *c*).

Fig. 4, b presents normalized dependencies of the capacitance C_{max}/C on the relative displacement x/[0,5(w+d)] for different ratios of w/g. The smallest value of $C_{\text{max}}/C_{\text{min}}$ (at x/[0,5(w+d)] = 1) is observed for w/g = 2, then it grows and achieves its maximum at w/g = 14, after which it again goes down at w/g = 20. Thus, there is an optimal width of the fingers of the electrodes w, at which it is possible to reach the greatest ratio of $C_{\text{max}}/C_{\text{min}}$.

The normalized dependencies of the capacitance C_{max}/C on the relative displacement x/[0,5(w+d)] of the moveable electrode for different thicknesses of the electrodes and widths of fingers of w = 1.4 mm (fig. 6). With the growth of the thickness of the electrodes t at an invariable width of fingers *w* the ratio $C_{\text{max}}/C_{\text{min}}$ will increase due to the fringing field effects and increase of the lateral surface of the electrodes (see fig. 5).

Diagram of the surface for the ratio of the maximal capacitance to the minimal $C_{\text{max}}/C_{\text{min}}$ on the ratios of w/g and t/g (fig. 7, see 4-th the side of cover). From the figure it is visible, that ratio of $C_{\text{max}}/C_{\text{min}}$ has its maximum at w/g = 14 and t/g = 20 and is equal to 3,73. Analysis shows, that the ratio of $C_{\rm max}/C_{\rm min}$, when it achieves its maximum at t/g = 20, gets its saturation and then practically stops growing.

Also of interest is the influence of the change of the interelectrode gap g on the electric capacitance C of the variable capacitor. Fig. 8 presents dependences of the capacitance C on the displacement x at various values of the interelectrode gap g = 90, 100 and 110 μ m, at fixed values w = 1,4 mm and t = 1,6 mm. When the gap g changes by \pm 10 % the maximal capacitance C_{max} changes not more than by 8,5 %, the minimal capacitance C_{\min} – not more than 1 %, and the ratio of $C_{\text{max}}/C_{\text{min}}$ —not more than 7,4 %. That is, a change of the interelectrode gap g results in a change of the maximal capacitance C_{max} , while the minimal capacitance C_{\min} changes insignificantly.

Of additional interest is the research of the influence of the number of electrodes N on the energy generated by the electrostatic generator. Dependence γ on the number of electrodes N, calculated for the design of the comb variable capacitor with the width of fingers w = 1.4 mm, thickness of electrodes t = 1.6 mm, and interelectrode gap g = 1 mm (fig. 9).

From the dependence in fig.9 it is visible, that the capacitor coefficient γ increases linearly with the growth of the number of electrodes N. Thus, it is more favorable to use a structure with a greater number of electrodes for reception of a bigger output capacitance. In this work N =13 was selected because of restrictions on the dimensions of the design, and, hence, on the number of the final elements for FEM and speed of calculations.

Conclusion

As a result the authors obtained and analyzed the dependences of the capacitance C of the comb variable capacitor with a changing area of overlapping of electrodes on the displacement of the moveable electrode xat various values of the width of fingers w and thickness of electrodes t.

Analysis demonstrated that:

- dependences C(x) have their maximal capacities at displacement of x = n(w + d), and their minimal capacifies at $x = n(n \pm 1/2)(w + d)$, where $n \in \mathbb{Z}$;
- there is an optimal width of fingers w, at which the
- biggest ratio of $C_{\text{max}}/C_{\text{min}}$ can be achieved; ratio of $C_{\text{max}}/C_{\text{min}}$ grows with the growth of t/g, and is saturated at $t/g \ge 20$;
- ratio of $C_{\text{max}}/C_{\text{min}}$ has its maximum at w/g = 14 and t/g = 20 and is equal to 3,73;
- in a design with w = 1,4 mm and t = 1,6 mm, a change of gap g by \pm 10 % changes the ratio of $C_{\rm max}/C_{\rm min}$ by not more, than 7,4 %;
- for obtaining of a bigger output capacitance it is necessary to use a 3D design of the comb variable capacitor with a bigger number of electrodes N.

The results of the work allow us to calculate more precisely the optimal design of the comb variable capacitor used in MEMC of energy.

References

1. Akyildiz I. F., Su W., Sankarasubramaniam Y., Cayirci E. Wireless sensor networks: a survey, Computer Networks, 2002, vol. 38, pp. 393-422.

vol. 38, pp. 393–422.
2. O Mathúna C., O'Donnell T., Martinez-Catala R. V., Rohan J., O'Flynn B. Energy scavenging for long-term deployable wireless sensor networks, *Talanta*, 2008, vol. 75, pp. 613–623.
3. Torres E. O., Rincon-Mora G. A. Electrostatic Energy-Harvesting and Battery-Charging CMOS System Prototype, *Circuits and Systems I: Regular Papers, IEEE Transactions*, 2009, vol. 56, Iss. 9, pp. 1938–1948.
4. Mitcheson P. D., Yeatman E. M., Rao G. K., Holmes A. S., Green T. C. Energy Harvesting From Human and Machine Mo-

Green T. C. Energy Harvesting From Human and Machine Mo-tion for Wireless Electronic Devices, *Proceedings of the IEEE*, 2008, vol. 96, no. 9, pp. 1457–1486.
5. Beeby S. P., Tudor M. J., White N. M. Energy harvesting vibration sources for microsystems applications, *Measurement Sci-*orae and Tachnelogy 2006, vol. 17, pp. 175–195.

ence and Technology, 2006, vol. 17, pp. 175—195.
6. Dragunov V. P., Dorzhiev V.Yu. Nachal'nyye usloviya i di-

namicheskiy PULL-in effekt v MEMS s izmenyayushchimsya mezhelektrod-nym zazorom [The Initial Conditions and Dynamic Pull-In Effect in Gap-Closing MEMS], Nano- i mikrosistemnaya tekhnika [Journal of Nano and Microsystem Technique], 2015,

no. 10 (183), pp. 31–41.
7. Dragunov V. P., Ostertak D. I. Elektrostaticheskie vzaimodeistviya v MEMS so vstrechno-shtyrevoi strukturoi [Coulomb interactions in interdigitated MEMS], Doklady Akademii nauk vysshei shkoly Rossiiskoi Federatsii [Proceedings of the Russian higher school Academy of sciences], 2009, no. 1 (12), pp. 99–106.
8. Dragunov V. P., Kolchuzhin V. A., Ostertak D. I. Vliyanie

kraevykh effektov na elektri-cheskuyu emkosť v MEMS [Fringing field effect on electric capacitance in MEMS], *Doklady Akademii* nauk vysshei shkoly Rossiiskoi Federatsii [Proceedings of the Russian higher school Academy of sciences], 2009, no. 2 (13), pp. 97–105. 9. Basset P., Galayko D., Paracha A. M., Marty F., Dudka A.,

Bourouina T. A batch-fabricated and electret-free silicon electrostatic vibration energy harvester, Journal of Micromechanics and Microengineering, 2009, vol. 19, no. 11, pp. 115025/1-115025/12.

10. Blum K. E., Ostertak D. I. Optimizatsiya peremennogo kondensatora grebenchatogo tipa dlya mikro elektromekhan-icheskogo preobrazovatelya energii [Comb Variable Capacitor Optimization for the Microelectromechanical Power Converter], Doklady Akademii nauk vysshei shkoly Rossiiskoi Federatsii [Proceedings of the Russian higher school Academy of sciences], 2015, no. 1 (26), pp. 20-30.

Элементы MHCT Micro-AND NANOSYSTEM TECHNIQUE ELEMENTS

УДК 681.586.2

В. А. Гридчин¹, д-р техн. наук, проф., В. Б. Зиновьев², канд. техн. наук, нач. лаб., М. А. Чебанов², инженер-конструктор, e-mail: chebanov100@gmail.com ¹ Новосибирский Государственный Технический Университет ² АО "НПП "Восток", г. Новосибирск

МИКРОПРОФИЛИРОВАНИЕ И ОПТИМИЗАЦИЯ ХАРАКТЕРИСТИК КРЕМНИЕВЫХ СЕНСОРОВ ДАВЛЕНИЯ

Поступила в редакцию 04.04.2016 г.

Рассмотрены особенности тензорезистивного кремниевого сенсора давления с упругим элементом в виде квадратной диафрагмы, у которой на лицевой стороне с помощью микропрофилирования созданы линейные концентраторы напряжений. Проведено математическое моделирование преобразовательной характеристики и нелинейности сенсора с помощью конечно-элементного моделирования в пакете программ ANSYS. Получено экспериментальное подтверждение результатов моделирования.

Ключевые слова: тензорезистивный сенсор давления; метод конечных элементов

Введение

Доля кремниевых сенсоров давления на мировом рынке продаж составляет около 12 % и продолжает расти [1]. Этому способствуют потенциальные возможности микросистемной технологии, успехи материаловедения и достижения микроэлектроники. Область применения непрерывно расширяется, в частности, в направлении создания сенсоров для экстремальных условий эксплуатации [2]. Несмотря на полувековую историю развития поиск новых физико-технологических решений для сенсоров давления продолжается до сих пор [3—6].

Фундаментальную роль в повышении конкурентоспособности кремниевых сенсоров давления играют новые тензорезистивные структуры, способы профилирования и методы проектирования. Традиционные интегральные тензорезисторы постепенно вытесняются тензорезисторами с диэлектрической изоляцией как более надежными и перспективными. Такие тензорезисторы имеют вид мезаструктур, что необходимо учитывать при проектировании сенсоров [7]. Исходные пластины для производства вполне доступны, и цена их непрерывно снижается.

При создании новых типов сенсоров с хорошим соотношением цена — качество важнейшую роль играют технологии формирования трехмерной структуры упругих элементов. К настоящему времени разработаны технологии жидкостного и "сухого" травления (плазмохимическое, ионное), которые позволяют создавать упругие элементы разнообразных форм. Жидкостное анизотропное травление применяется для глубокого профилирования кремниевых пластин с обратной стороны при создании упругих элементов с плоской диафрагмой либо с одним или несколькими жесткими центрами [8].

Для создания сенсоров на малые давления (≤10 кПа) оказалось целесообразным комбинировать технологии глубокого травления с обратной стороны и "сухого" травления с лицевой стороны пластины на небольшую глубину — микропрофилирование (≤40 мкм) [9—11]. На лицевой стороне формируются утолщения в виде балок различных форм. Тензорезисторы при этом имеют традиционную топологию: располагаются у краев диафрагмы и имеют продольно-поперечную ориентацию.

Проектирование сенсоров с такими сложными формами упругих элементов возможно лишь с применением численных методов, из которых наибольшую популярность получил метод конечных элементов. Микропрофилирование с лицевой стороны пластины в сочетании с численными методами расчета открывает новые возможности для построения сенсоров давления с улучшенными метрологическими характеристиками.

В данной работе предложен новый вариант микропрофилирования, отличающийся от описанных в работах [9—11], который позволяет реализовать новую топологию тензорезисторов, увеличить чувствительность и уменьшить нелинейность сенсоров. Результаты моделирования подтверждаются экспериментальными данными.

Структура сенсора и математическая модель

Микропрофилирование с лицевой стороны пластины позволяет локально управлять полем деформации, непосредственно воздействующим на тензорезистор. Этот эффект накладывается на общую деформацию упругого элемента, задаваемую глубоким профилированием с обратной стороны пластины, и возникает возможность новых топологических решений для сенсоров.

Размещение четырех тензорезисторов, входящих в мост Уинстона, должно удовлетворять ряду требований:

- обеспечение максимальной чувствительности;
- минимизация нелинейности;
- обеспечение необходимого запаса прочности упругого элемента;
- желательность размещения тензорезисторов в областях с меньшим градиентом деформаций, что минимизирует ошибки фотолитографии.

В рассматриваемом сенсоре давления глубокое травление с обратной стороны обеспечивает формирование плоской задней стороны диафрагмы и ее необходимую общую толщину. С лицевой стороны пластины с помощью микропрофилирования создаются 12 углублений, между которыми располагаются линейные концентраторы напряжения. На концентраторах размещаются мезатензо-







Рис. 2. Конечно-элементные модели упругого элемента (a), тензорезистора (b)



резисторы с диэлектрической изоляцией, два из которых находятся в центре, а два других — у краев диафрагмы (рис. 1).

Расчет оптимальных геометрических размеров упругого элемента такого типа представляет нетривиальную задачу, решение которой требует использования современных методов математического моделирования. Поэтому проектирование сенсора проводилось в пакете программ конечноэлементного моделирования ANSYS. Для увеличения скорости расчета из модели были исключены изолирующие и защитные пленки, поскольку их толщина существенно меньше толщины диафрагмы упругого элемента.

Модель упругого элемента была составлена из конечных элементов SOLID185, имеющих форму шестигранников, каждая из вершин которого может совершать перемещения в трех измерениях. Элемент позволяет использовать итерационный метод Ньютона — Рафсона для выполнения расчета деформации твердого тела произвольной формы. Конечно-элементная модель приведена на рис. 2, *а.*

Для определения изменения сопротивления тензорезисторов применялась техника подмоделирования. Подмодель (рис. 2, *b*) состоит из фрагмента концентратора и тензорезистора. Фрагмент



Рис. 3. Граничные условия и нагрузка модели упругого элемента (*a*) и подмодели тензорезистора (*b*)

Fig. 3. Boundary conditions and load of the elastic element finite element model (a) and of the piezoresistor submodel (b)

концентратора был составлен из конечных элементов второго порядка SOLID186, а тензорезистор из элементов второго порядка SOLID226. Элемент SOLID226 позволяет решать связанную задачу тензорезистивного анализа, объединяя пространственное перемещение и электрические потенциалы. В подмодели также была задействована итерационная схема Ньютона — Рафсона для учета нелинейных эффектов.

Упругие свойства кремния определялись в виде полной матрицы упругих постоянных в осях x[110], $y[1\overline{10}]$, z[001]. С учетом симметрии расположения тензорезисторов при изменении сопротивления принимались во внимание лишь продольное и по-перечное пьезосопротивления.

Граничные условия для упругого элемента задавались в виде полного ограничения узловых точек в плоскости обратной стороны опорной рамки, нагрузка в виде измеряемого давления прилагалась к лицевой поверхности сенсора. Узлы на поверхности под диафрагмой никак не были ограничены в перемещениях и не испытывали внешних нагрузок (рис. 3, *a*).

Граничные условия по перемещениям передавались от модели упругого элемента через границу среза на подмодель тензорезистора (рис. 3, *b*). На остальные узлы внешней поверхности подмодели прилагалось измеряемое давление. Разность потенциалов на контактных площадках тензорезистора была зафиксирована величиной U = 5 В.

Результаты моделирования

Объектом моделирования служил сенсор на номинальное давление $P_{\rm H} = 2 \cdot 10^5$ Па, с размерами чипа 4 × 4 мм, площадью диафрагмы 2 × 2 мм и высотой опорной рамки 0,42 мм. Целью моделирования являлось достижение максимальной чувствительности, минимальной нелинейности при заданном коэффициенте запаса прочности K = 3. Коэффициенты пьезосопротивления материала тензорезистора принимались $\pi_l = 18 \cdot 10^{-11}$ Па⁻¹, $\pi_l = 9,84 \cdot 10^{-11}$ Па⁻¹. Нелинейность эффекта пьезосопротивления не учитывалась.

Численное моделирование позволило найти оптимальные размеры углублений и концентраторов. Квадратная диафрагма должна иметь толщину 50 мкм, углубления 200 × 200 × 200 мкм, ширину кон-



Рис. 4. Распределение деформации (a) и нелинейных составляющих деформации вдоль средней линии диафрагмы (b)

Fig. 4. Longitudinal ε_x and transverse ε_y strain components distributions along the diaphragm axis of symmetry (a) and their nonlinear constituents ε_x^n , ε_y^n distributions along the same path (b) центраторов 80 мкм. Тензорезистор выбран размером $10 \times 450 \times 0,5$ мкм с контактными площадками 50×25 мкм.

Результаты расчета продольной ε_x и поперечной ε_y деформации вдоль средней линии упругого элемента сенсора давления представлены на рис. 4, *а*. Области положительных и отрицательных значений ε_x находятся в пределах краевых и центральных концентраторов. Поперечная компонента ε_y в этих областях принимает значение, близкое к нулю. Максимальное значение деформации не превосходит значение $\pm 1 \cdot 10^{-3}$, что обеспечивает коэффициент запаса прочности не менее 3.

При оптимизации характеристик сенсора особое значение приобретает нелинейная составляющая деформации из-за растягивающих напряжений в диафрагме, нарушающая пропорциональность между измеряемой нагрузкой и изменением сопротивления. На рис. 4, *b* представлены координатные зависимости нелинейных составляющих деформаций ε_x^{H} и ε_y^{H} . Компонента ε_x^{H} оказывает наибольшее влияние на нелинейность преобразовательной характеристики сенсора. В пределах краевого и центрального концентраторов компоненты ε_x^{H} и ε_y^{H} согласованы по величине и знаку. Это минимизирует их влияние на нелинейность преобразовательной характеристики сенсора благодаря включению тензорезисторов по мостовой схеме.

Результаты тензорезистивного анализа подмодели представленына рис. 5, b (см. третью сторону обложки) в виде карты распределения относительного изменения сопротивления $\Delta R/R_0$ в пределах тела тензорезистора. Из-за неоднородного распределения деформации изменение сопротивления его отдельных частей становится также неоднородным. Выбирая соответствующее расположение центров тензорезисторов, можно добиться одинакового по абсолютной величине изменения их сопротивления.

Экспериментальная проверка результатов моделирования и обсуждение

Проверка результатов моделирования была проведена на опытной партии сенсоров давления со структурой поликристаллический кремний диэлектрик — кремний. Такие структуры наиболее дешевы и доступны, а поликристаллический кремний обладает гибкими физическими характеристиками, обеспечивающими достижение высоких метрологических характеристик. Выбор рациональной конструкции упругого элемента позволяет в значительной мере компенсировать меньшее значение тензочувствительности поликремниевых тензорезисторов по сравнению с монокристаллическими. Физико-технологические проблемы создания сенсоров давления с поликремниевыми тензорезисторами рассмотрены в работе [12].

Образцы сенсоров давления, участвовавших в эксперименте, отличались друг от друга высотой концентраторов h и толщиной измерительной диафрагмы H. Образец 1 имел следующие размеры: H = 52 мкм, h = 32 мкм, образец 2 - H = 50 мкм, h = 30 мкм, образец 3 - H = 48 мкм, h = 25 мкм. Питание сенсоров осуществлялось от генератора тока I = 2,15 мА. Остальные геометрические размеры повторяли размеры математической модели. Квадратные углубления, формирующие концентраторы на лицевой стороне, создавались Bosch-процессом и имели вертикальные стенки. Сопротивление тензорезисторов составляло $R_0 = 1800$ Ом.

Зависимость выходного сигнала сенсора $U_{\rm Bbix}$ от приложенного давления P при моделировании определялась через сопротивление краевого $R_{\rm K}$ и центрального $R_{\rm II}$ резисторов:

$$U_{\rm Bbix}(P) = I \frac{R_{\rm K}(P) - R_{\rm II}(P)}{2}.$$
 (1)

Нелинейность преобразовательной характеристики сенсора определялась в каждой расчетной точке давления выражением

$$\gamma(P) = \frac{U_{\rm BMX}(P) - U_{\rm JUH}(P)}{U_{\rm BMX}(P_{\rm H})} \cdot 100 \%,$$
(2)

где $P_{\rm H}$ — номинальное измеряемое давление; $U_{\rm ЛИH}(P)$ — линейная расчетная преобразовательная характеристика сенсора, проходящая через точки $U_{\rm BЫX}(P=0)$ и $U_{\rm BЫX}(P=P_{\rm H})$.

Сравнение экспериментальных данных и результатов моделирования приведено на рис. 6. Пунктирными линиями отмечены расчетные данные, сплошными — результаты эксперимента.

Отличие расчетных от экспериментальных данных не превышает 5 %, что свидетельствует об адекватности математической модели. Выходной сигнал сенсора при номинальном давлении составляет около 100 мВ, а нелинейность во всех случаях не превышает 0,15 %. Разрушающее давление составляло примерно $(0,6...0,8) \cdot 10^6$ Па, что согласуется с результатами моделирования.

Сенсоры давления с традиционной конструкцией упругого элемента (без микропрофилирования с лицевой стороны и плоской диафрагмой), у которых поликремневые тензорезисторы работают на продольном и поперечном эффектах и расположены на краю диафрагмы, при прочих равных условиях имеют выходной сигнал на 30 % ниже, а по нелинейности уступают новому варианту сенсора в 2 раза. Микропрофилирование позволяет полу-



Рис. 6. Сравнение экспериментальных и теоретических расчетов преобразовательной характеристики (*a*) и зависимости нелинейности от приложенного давления (*b*)

Fig. 6. Comparison of measured and calculated data (a) of the output signal and nonlinearity error as a functions of applied pressure (b)

чать на сенсорах с тензорезисторами из поликристаллического кремния сигнал такого же порядка, как и на тензорезисторах из монокристаллического кремния на диэлектрике [13].

Сенсоры опытной партии, использованные в экспериментах, предназначены для массового производства и обладают дополнительными функциональными возможностями:

- калибровка выходного сигнала при номинальном давлении U_{вых} = 100 ± 1 мВ;
- калибровка начального разбаланса на заданный уровень, например $U_0 = 5 \text{ мB}$;
- температурная компенсация чувствительности при питании от генератора тока в интервале -60...+200 °C, α < 0,01 %/°C;

- температурная компенсация начального разбаланса β < 0,01 %/°С;
- контроль температуры с помощью терморезистора.

Указанные возможности реализуются с помощью резистивных элементов, находящихся на чипе.

Заключение

Микропрофилирование с лицевой стороны пластины и глубокое профилирование с обратной стороны позволяют создавать новые конструктивно-технологические варианты сенсоров давления и улучшать их метрологические характеристики. Приведенные в данной статье результаты в одинаковой мере относятся к тензорезисторам из поликристаллического и монокристаллического кремния.

Список литературы

1. **Yole** Development, Emerging consumer applications are boosting the growth of the MEMS pressure sensor market. MEMS Pressure Sensor report, April 2013.

2. **Kroetz G. H., Eickhoff M. H., Moeller H.**, Silicon compatible materials for harsh environment sensors // Sensors and Actuators, 1999. Vol. 74. P. 182–189.

3. **Mackwiak P., Schiffer M., Xu X.** et al. Design and simulation of ultra high sensitive piezoresistive MEMS sensor with structured membrane for low pressure applications // 12 Electronics Packaging Technology Conference. 2010.

4. Ayerdi I., Castano E., Garcia-Alonso A. et al. High-temperature ceramic pressure sensor // Sensors and Actuators, A60. 1997. P. 72–75.

5. Sujatha L., Kale V. S., Bhattacharya E. Critical study of high-sensitivity pressure sensors with silicon/porous silicon composite membranes // Journal of Micro/Nanolithography, MEMS and MOEMS, Jul.—Sept. 2009, Vol. 8, N. 3, id 033070/.

6. Гридчин В. А., Васильев В. Ю., Чернов А.С. и др. Численное моделирование элементов фотоэлектрического волоконно-оптического сенсора давления // Нано- и микросистемная техника. 2014. № 6. С. 3–7.

7. **Любимский В. М.** Особенности передачи деформации от подложки к резистору в виде мезаструктуры // Микроэлектроника. 2007. Т. 30, № 5. С. 351—358.

8. Kovacs G. T. A. Micromachined transducers, Sourcebook: McGraw-Hill, 1998. 914 p.

9. Hein S., Schlichting V., Obermeier E. Piezoresistive silicon sensor for very low pressures based on the concept of stress concentration // Pros. 7th International conference on Solid-State Sensors and Actuators. 1993. P. 628–631.

10. Toriyama T., Tanimoto Y., Sugiyama S. Single crystal silicon nano-wire piezoresistors for mechanical sensors // Journal of Micromechanical Systems, Oct. 2002, Vol. 11, N. 5. P. 605–611.

1. **Tian B., Zhao B., Jiang Z.** The novel structural design for pressure sensors // Sensor Review. 2010. Vol. 30, N. 4. P. 303–315.

11. Гридчин В. А., Любимский В. М. Физико-технологические проблемы создания поликремниевых сенсоров давления // Приборы. 2005. Т. 60, № 6. С. 23—27.

12. **Баринов И. Н.** Результаты исследования высокотемпературных полупроводниковых чувствительных элементов датчиков давления на основе структуры кремний на диэлектрике // Компоненты и технологии. 2008. № 11. С. 30—32.

V. A. Gridchin¹, D. Sc., Professor, V. B. Zinovyev², Ph.D., Head of Laboratory, M. A. Chebanov², Design Engineer, e-mail: chebanov100@gmail.com
 ¹ Novosibirsk State Technical University
 ² NPP Vostok Co., Novosibirsk

Microprofiling and Optimization of Characteristics of the Silicon Pressure Sensors

The article is devoted to the specific features of the piezoresistive silicon pressure sensors with an elastic element in the form of a square diaphragm and microstuctured linear stress concentrators on the front side. The pressure sensor's transforming characteristics, as well as its nonlinearity, were simulated by means of the finite element method in ANSYS software package. An experimental verification of the simulation results was also obtained.

Keywords: piezoresistive pressure sensor; finitee element method

Introduction

The share of the silicon pressure sensors in the world market is about 12 % and it continues to grow [1] due to the potentials of the microsystem technology, success of the material science and achievements in microelectronics. The sphere of their applications continuously extends, in particular, in the direction of development of sensors for extreme conditions [2]. Despite a semicentennial history of the development, the search for new solutions for the pressure sensors still continues [3–6].

A fundamental role in increasing of the competitiveness of the silicon pressure sensors is played by the piezoresistive structures, ways of profiling and methods of designing. The traditional integrated resistive-strain sensors are replaced by the resistive-strain sensors with dielectric insulation as more reliable and promising. Such resistive-strain sensors look like mesa-structures, which should be taken into account during designing of the sensors [7]. The initial plates for their production are accessible and their price decreases.

In creation of new sensors with a good price-quality ratio the major role is played by the technologies for formation of a three-dimensional structure of the elastic elements. Technologies of liquid and "dry" (plasmachemical, ionic) etching are already available, which allow us to create elastic elements of various forms. The liquid anisotropic etching is applied for a deep profiling of the silicon plates from the reverse side for creation of the elastic elements with a flat diaphragm or with one or several rigid centers [8].

For creation of small pressure sensors (≤ 10 kPa) it is expedient to combine the deep etching technologies on the reverse side and "dry" etching on the plate's face side at a small depth — microprofiling ($\leq 40 \ \mu$ m) [9—11]. On the face side various beam-like thickenings are formed. The resistive-strain sensors have traditional topology: they are located at the edges of the diaphragm and have longitudinal-cross orientation.

Designing of the sensors with such forms of the elastic elements is possible only with application of the numerical methods, out of which the most popular is the method of the finite elements. Microprofiling from the face side in combination with the numerical methods of calculation opens possibilities for construction of the pressure sensors with improved metrological characteristics.

In this work a version of microprofiling is offered differing from [9-11] and allowing to realize a new topology of the resistive-strain sensors, to increase their sensitivity and reduce their nonlinearity. The results of modeling are proven by the experimental data.

Sensor's structure and mathematical model

Microprofiling on the face side allows us to operate locally the deformation field, directly influencing the resistive-strain sensor. This effect is imposed on the general deformation of an elastic element set by a deep profiling from the reverse side of the plate, which opens a possibility for new topological solutions for the sensors.

Placing of four resistive-strain sensors, comprising the Winston's bridge should meet a number of requirements:

- ensuring of the maximal sensitivity;
- minimization of nonlinearity;
- ensuring of the necessary safety factor of the elastic element;
- desirability of placing of the resistive-strain sensors in the areas with a smaller gradient of deformations, which minimizes the photolithography errors.

In the considered pressure sensor a deep etching on the reverse side ensures formation of a flat back side diaphragm and its necessary total thickness. On the face side of a plate by means of microprofiling 12 deepenings are made, between which the linear concentrators of pressure are located. On the concentrators there are mesa-resistive-strain sensors with the dielectric insulation, two of which are in the centre, and the other two are at the edges of the diaphragm (fig. 1).

Calculation of the optimal dimensions of such an elastic element is not a trivial task, and it demands the use of the methods of mathematical modeling. Therefore, the sensor was designed within ANSYS software package for the finite-element modeling. In order to increase the speed of calculation, the insulating and protective films were excluded from the model, because their thickness was essentially less than the thickness of the diaphragm of the elastic element.

The model of the elastic element is made of the finite elements of SOLID185 having the form of hexahedrons, each of the tops of which can move in three directions. The element allows us to use the iterative method of Newton — Raphson for calculation of the deformations of a solid body of any form. The finite-element model is presented in fig. 2, a.

In order to determine the change of resistance of the resistive-strain sensors the technique of submodeling was applied. The submodel (fig. 2, b) consists of a fragment of a concentrator and a resistive-strain sensor. The concentrator's fragment is made of the finite elements of the second order SOLID186, and the resistive-strain sensor — from the elements of the second order SOLID226. Element SOLID226 allows us to solve the problem of the resistive-strain sensor analysis, combining the spatial movement and the electric potentials. Newton-Raphson iterative scheme also is involved in the submodel for taking into account the non-linear effects.

The elastic properties of silicon were defined in the form of a full matrix of the elastic constants in the axes of x[110], $y[1\overline{10}]$ and z[001]. Taking into account the symmetry of the arrangement of the resistive-strain sensors, during the resistance change only the longitudinal and cross-section piezoresistance was considered.

The boundary conditions for the elastic element were set in the form of a full restriction of the nodal points in the plane of the reverse side of the basic framework, a load in the form of the measured pressure was applied to the face surface of the sensor. The nodes on the surface under the diaphragm were not limited in any way in their movement and were not subjected to the external loads (fig. 3, a).

The boundary conditions concerning the movement were transferred from the model of the elastic element through the cut border to the submodel of the resistive-strain sensor (fig. 3, *b*). To the other nodes of the external surface of the submodel the measured pressure was applied. The potential difference on the contact platforms of the resistive-strain sensor was fixed by value U = 5 V.

Results of modeling

The object of modeling was a sensor for the nominal pressure of $P_{\rm H} = 2 \cdot 10^5$ Pa, with the chip size of 4×4 mm, the diaphragm area of 2×2 mm and the height of the basic framework of 0,42 mm. The aim of modeling was achievement of the maximal sensitivity, the minimal nonlinearity at the set factor of safety K = 3. The factors of piezoresistance of the material of the resistivestrain sensor were accepted as $\pi_l = 18 \cdot 10^{-11}$ Pa⁻¹, $\pi_t = 9,84 \cdot 10^{-11}$ Pa⁻¹. The nonlinearity of the effect of piezoresistance was not considered. The numerical modeling allowed us to find the optimal dimensions of the deepenings and concentrators. The square diaphragm should have a thickness of 50 μ m, deepenings — 200×200×20 μ m, width of the concentrators — 80 μ m. A resistive-strain sensor was selected with the size of 10×450×0,5 μ m and contact platforms of 50×25 μ m.

The results of calculation of the longitudinal ε_x and cross ε_y deformations along the middle line of the elastic element of the pressure sensor are presented in fig. 4, *a*. The areas of the positive and negative values of ε_x are within the limits of the regional and central concentrators. The cross component ε_y in these areas accepts the value close to zero. The maximal value of the deformation does not exceed the value of $\pm 1 \cdot 10^{-3}$ which ensures the factor of safety not less than 3.

During optimization of the sensor's characteristics, of special significance is the nonlinear component of the deformation because of the tensile stresses in the diaphragm, breaking the proportionality between the measured load and resistance change. Fig. 4, *b* presents the co-ordinate dependences of the nonlinear components of deformations ε_x^H and ε_y^H . Component ε_x^H exerts the greatest influence on the nonlinearity of the converting characteristic of the sensor. Within the regional and central concentrators the components ε_x^H and ε_y^H are co-ordinated by their sizes and signs. This minimizes their influence on the nonlinearity of the converting characteristic of the sensor thanks to inclusion of the resistive-strain sensors under the bridge scheme.

The results of the piezoresistive submodel analysis are presented in fig. 5 (see 3-rd the side of cover) in the form of a map of distribution of the relative change of resistance $\Delta R/R_0$ within the body of the resistive-strain sensor. Because of a non-uniform distribution of the deformation the change of resistance of its separate parts also becomes non-uniform. By choosing a corresponding arrangement of the centers of the resistivestrain sensors it is possible to achieve an identical change by the absolute value of their resistance.

Experimental check of the results of modeling and discussion

Check of the modeling was done on an experimental batch of the pressure sensors with the structure of polycrystalline silicon — dielectric — silicon. Such structures are the cheapest, and the polycrystalline silicon possesses the flexible characteristics, which ensure achievement of high metrological characteristics. The choice of a rational design of the elastic element allows us to compensate for smaller value of the tensosensitivity of the polysilicon resistive-strain sensors in comparison with the monocrystalline ones. The physical-technological problems of development of the pressure polysilicon resistive-strain sensors are considered in [12]. The samples of the pressure sensors differed from each other in height of the concentrators *h* and thickness of the measuring diaphragm *H*. Sample 1 had the following dimensions: $H = 52 \ \mu\text{m}$, $h = 32 \ \mu\text{m}$, sample 2 — $H = 50 \ \mu\text{m}$, $h = 30 \ \mu\text{m}$, sample 3 — $H = 48 \ \mu\text{m}$, $h = 25 \ \mu\text{m}$. Power supply for the sensors was provided from the generator of current $I = 2,15 \ \text{mA}$. Other dimensions repeated the dimensions of the mathematical model. The square deepenings forming the concentrators on the face side were created by Bosch process and had vertical walls. Resistance of the resistive-strain sensors was $R_0 = 1800 \ \Omega$.

Dependence of the output signal of sensor U_{out} on pressure *P* during modeling was defined through the resistance of the edge $R_{\rm K}$ and central $R_{\rm II}$ resistors:

$$U_{out}(P) = I \frac{R_{\rm K}(P) - R_{\rm II}(P)}{2}$$
 (1)

Nonlinearity of the converting characteristic of the sensor was defined in each pressure reference point by the expression:

$$\gamma(P) = \frac{U_{out}(P) - U_{\pi \nu \mu}(P)}{U_{out}(P_{\mu})} \cdot 100 \%, \qquad (2)$$

where $P_{\rm H}$ — is nominal measured pressure; $U_{\rm ЛИH}(P)$ linear calculated converting characteristic of the sensor passing through $U_{out}(P=0)$ and $U_{out}(P=P_{\rm H})$ points.

Comparison of the experiment and the results of modeling is presented in fig. 6, a and fig. 6, b. The dotted lines demonstrate the calculation data, and continuous lines — the results of the experiment.

The difference between the calculation data and the experimental data did not exceed 5 %, which testifies to the adequacy of the model. The output signal of the sensor at a nominal pressure was about 100 mV, and the nonlinearity did not exceed 0.15 %. The destroying pressure was about $(0,6...0,8) \cdot 10^6$ Pa, which agrees well with the results of modeling.

The pressure sensors of the traditional design of the elastic element (without microprofiling on the face side and a flat diaphragm), the polysilicon resistive-strain sensors of which work on the longitudinal and cross effect and are located on the edge of the diaphragm, with the other characteristics being equal, have an output signal by 30 % lower, and their nonlinearity is twice as low compared with the new version of the sensor. The microprofiling allows us to receive on the resistive-strain sensors from polycrystalline silicon a signal of the same order, as on the resistive-strain sensors from monocrystalline line silicon on a dielectric [13].

Experimental batch sensors are intended for mass production and possess additional functionalities:

• calibration of the output signal at nominal pressure $U_{out} = 100 \pm 1 \text{ mV};$

- calibration of the initial unbalance on the set level, for example, $U_0 = 5$ mV;
- temperature compensation for sensitivity with the power supplied from a current generator within the interval of -60÷+200 °C, α < 0,01 %/°C;
- temperature compensation for the initial unbalance, β < 0,01 %/°C;
- possibility of controlling the temperature by means of thermistors.

The above possibilities are realized by means of the resistive elements situated on a chip.

Conclusion

Microprofiling on the face side of a plate and deep profiling on the reverse side allow us to create new design-technological versions of the pressure sensors and improve their metrological characteristics. The results presented in the article equally refer to the resistivestrain sensors from the polycrystalline and monocrystalline silicon.

References

1. Yole Development, Emerging consumer applications are boosting the growth of the MEMS pressure sensor market, *MEMS Pressure Sensor report*, April 2013.

2. Kroetz G. H., Eickhoff M. H., Moeller H. Silicon compatible materials for harsh environment sensors, *Sensors and Actuators*, 1999, vol. 74, pp. 182–189.

3. Mackwiak P., Schiffer M., Xu X. et al. Design and simulation of ultra high sensitive piezoresistive MEMS sensor with structured membrane for low pressure applications, *12 Electronics Packaging Technology Conference*, 2010.

4. Ayerdi I., Castano E., Garcia-Alonso A. et al. High-temperature ceramic pressure sensor, *Sensors and Actuators*, A60, 1997, pp. 72–75.

5. Sujatha L., Kale V. S., Bhattacharya E. Critical study of high-sensitivity pressure sensors with silicon/porous silicon composite membranes, *Journal of Micro/Nanolithography, MEMS and MOEMS*, Jul.—Sept. 2009, vol. 8, no. 3.

6. Gridchin V. A., Vasil'ev V.Ju., Chernov A. S. et al. Chislennoe modelirovanie jelementov fotojelektricheskogo volokonno-opticheskogo sensora davlenija // Nano- i mikrosistemnaja tehnika, 2014, no. 6, pp. 3–7.

7. **Ljubimskij V. M.** Osobennosti peredachi deformacii ot podlozhki k rezistoru v vide mezastruktury, *Mikrojelektonika*, 2007, vol. 30, no. 5. P. 351–358.

8. Kovacs G. T. A. Micromachined transducers, Sourcebook, McGraw-Hill, 1998. 914 p.

9. Hein S., Schlichting V., Obermeier E. Piezoresistive silicon sensor for very low pressures based on the concept of stress concentration, *Pros. 7th International conference on Solid-State Sensors and Actuators*, 1993, pp. 628–631.

10. Toriyama T., Tanimoto Y., Sugiyama S. Single crystal silicon nano-wire piezoresistors for mechanical sensors, *Journal of Micromechanical Systems*, Oct. 2002, vol. 11, no. 5, pp. 605–611.

11. Tian B., Zhao B., Jiang Z. The novel structural design for pressure sensors, *Sensor Review*, 2010, vol. 30, no. 4, pp. 303–315.

12. Gridchin V. A., Ljubimskij V. M. Fiziko-tehnologicheskie problemy sozdanija polikremnevyh sensorov davlenija, *Pribory*, 2005, no. 6 (60), pp. 23–27.

13. **Barinov I. N.** Rezul'taty issledovanija vysokotemperaturnyh poluprovodnikovyh chuvstvitel'nyh jelementov datchikov davlenija na osnove struktury kremnij na dijelektrike, *Komponenty i tehnologii*, 2008, no. 11, pp. 30–32. **О. В. Лобач**, ст. преподаватель, e-mail: oleg.lobach@gmail.com, Новосибирский государственный технический университет

БЕСПРОВОДНАЯ СИСТЕМА МОНИТОРИНГА ТЕПЛОВЫХ ПОТЕРЬ НА ОСНОВЕ МЭМС-СЕНСОРА ТЕПЛОВОГО ПОТОКА

Поступила в редакцию 04.04.2016 г.

Рассматриваются вопросы построения на базе МЭМС-сенсора теплового потока беспроводной сенсорной сети для мониторинга тепловых потерь устройств и сооружений. В радиочастотном тракте применена интегральная микросхема типа система-на-кристалле (SoC)STM32W108 компании STMicroelectronics, состоящая из радиомодуля с поддержкой стека ZigBee и микроконтроллера с ядром CortexM0. Предложен макет простой сенсорной сети с топологией типа "звезда".

Ключевые слова: МЭМС, сенсор теплового потока, беспроводные сенсорные сети, ZigBee

Введение

Контроль расхода теплоносителей представляет важнейшую техническую задачу. Особый практический интерес имеет измерение тепловых потоков и связанные с этим вопросы повышения точности, информативности и удобства измерений.

В качестве измерительных устройств для этих целей используют сенсоры теплового потока и тепловизоры [1—3]. Применение одиночных сенсоров не позволяет проводить полноценный анализ теплового баланса сооружений. Для этого целесообразно использовать комплексные решения. Например, применение беспроводной сенсорной системы на основе тепловых сенсоров позволяет иметь полную картину распределения теплоты, а передача данных по радиоканалу упрощает съем и обработку данных в реальном масштабе времени. Эта концепция начала находить применение в системах "умный дом", где, наряду с беспроводным управлением источниками электропитания, стали применять устройства управления теплопотреблением [4, 5].

В настоящей работе описана практическая реализация беспроводной сенсорной сети (БСС) на основе разработанного кремниевого МЭМС-сенсора теплового потока.

Сенсор теплового потока

Измерительным элементом теплопотерь в БСС является кремниевый МЭМС-сенсор теплового потока. Общая идея измерения тепловых потерь, лежащая в основе работы большинства промышленных сенсоров теплового потока, заключается в следующем (рис. 1): теплота проходит сквозь сенсор в указанном направлении, материал сенсора выполняет роль дополнительной стенки (если считать основной стенкой исследуемый объект). Проходящий поток теплоты создает температурный градиент в сенсоре, который регистрируется тем или иным способом.

В большинстве сенсоров теплового потока чувствительным элементом является термобатарея (большое число термопар, связанных последовательно). Единичная термопара генерирует выходное напряжение, которое пропорционально температурному перепаду между спаями. Этот перепад, при условии, что ошибки исключены, пропорционален потоку теплоты, и зависит только от толщины и теплового сопротивления сенсора. Использование большего числа термопар увеличивает выходной сигнал. На рис. 1 спаи термобатареи расположены на горячей и холодной сторонах сенсора. Термопара встраивается в основной материал сенсора, обычно пластмассу.

Отличие конструкции МЭМС-сенсора теплового потока от классической (см. рис. 1), связано с невозможностью формирования спаев термопар на противоположных сторонах пластины с помощью микроэлектронной технологии. Поэтому структура МЭМС-сенсора (рис. 2) содержит чувствительный



Рис. 1. Принцип измерения теплового потока: 1 — чувствительный элемент; 2 — холодная сторона; 3 — горячая сторона; 4 — тепловой поток

Fig. 1. Measurement of a heat flow: 1 - sensor element (SE); 2 - cold side; 3 - hot side; 4 - heat flow



Рис. 2. Принцип действия МЭМС-сенсора теплового потока: *I* — чувствительный элемент; *2* — тепловой поток; *3* — теплопровод; *4* — крышка

Fig. 2. The principle of operation of the heat flux sensor MEMS: 1 - SE; 2 - heat flow; 3 - thermal conductivity; 4 - cover



Рис. 3. Топология ЧЭ МЭМС-сенсора теплового потока: 1 — батарея термопар, 2 — резисторы для самокалибровки *Fig. 3. Topology of SE MEMS of the thermal flow sensor:* 1 — battery of thermocouples, 2 — self-calibration resistors



Рис. 4. МЭМС-сенсор теплового потока Fig. 4. MEMS thermal flow sensor

элемент 1 (ЧЭ), на котором возникает разность температур в плоскости кремниевой мембраны. Теплопровод 3 служит для того, чтобы тепловой поток 2, падающий на всю верхнюю крышку сенсора, передавался только на центральную часть ЧЭ. Нижняя крышка 4, так же как и верхняя, выравнивает температуру на поверхности сенсора, чтобы локальные тепловые потоки не вносили существенных изменений в распределение температуры, и защищает сенсор от механических воздействий.

Ключевым элементом конструкции МЭМС-сенсора теплового потока [6] является чувствительный элемент (рис. 3), представляющий собой профилированную кремниевую мембрану с батареей из ста последовательно соединенных поликремнийалюминиевых термопар. Размер чувствительного элемента 9×9 мм, размер тонкой части 5×5 мм, толщина тонкой части 12...15 мкм. Топология ЧЭ включает кроме термопар два поликремниевых резистора, расположенных в центре мембраны. С помощью данных резисторов можно осуществлять самокалибровку ЧЭ сенсора [7].

На рис. 4 показан общий вид сенсора теплового потока. Размеры сенсора: диаметр 28 мм, толщина 4 мм. Коэффициент преобразования сенсора, прошедшего испытания в Сибирском научно-исследовательском институте метрологии (СНИИМ), равен 18,78 Вт/($m^2 \cdot mB$).

Разработка БСС и программного обеспечения

Беспроводные сенсорные сети являются одним из самых перспективных направлений развития современных телекоммуникационных технологий. Перспективы их применения связаны как с заменой кабельной инфраструктуры на радиоэфир, так и с новыми функциональными возможностями. Беспроводная сенсорная сеть — распределенная, самоорганизующаяся сеть множества сенсоров и исполнительных устройств, объединенных между собой посредством радиоканала.

В настоящее время существует большое число разновидностей таких сетей, отличающихся как организацией, так и сферой применения. Наиболее известными протоколами таких сетей являются *Wi-Fi*, который наряду с *Wireless USB* используется для передачи больших потоков данных (видео, аудио) и *Bluetooth*, применяемый для передачи данных небольшого объема на короткие расстояния. Основным недостатком этих протоколов является высокое энергопотребление.

В 2003 г. группой компаний — разработчиков электронной техники был создан стандарт IEEE 802.15.4, описывающий принципы функционирования беспроводной передачи данных по протоколу ZigBee. Этот стандарт занял пустовавшую нишу низкоскоростных и практически не потребляющих энергию протоколов, рассчитанных на длительную автономную работу [8].

Протокол *ZigBee* специально рассчитан на низкую скорость передачи данных, так как для передачи информации от сенсоров не нужна большая скорость. При этом протокол отличается высоким энергосбережением.

Протокол *ZigBee* поддерживает три вида устройств:

- координатор сети, который инициализирует развертывание сети, управляет узлами сети, хранит сетевую информацию;
- устройство сбора и передачи данных, чаще всего интеллектуальный сенсор;
- маршрутизатор сети, участвующий в обмене данными, в качестве промежуточного звена между двумя узлами сети.

Беспроводные сети на основе этих устройств могут иметь одну из топологий, представленных на рис. 5 (см. четвертую сторону обложки).

В топологии типа "точка—точка" сбор данных осуществляется только с одного устройства, топология типа "звезда" включает координатор, который принимает информацию от нескольких устройств сбора данных. Топологии типа "mesh" и "кластерное дерево" имеют более сложную разветвленную структуру, в состав которой дополнительно входят маршрутизаторы [9]. В данной работе выбрана БСС на основе сенсоров теплового потока, имеющая топологию типа "звезда", в этом случае необходим только один координатор сети, который будет осуществлять прием данных с сенсоров и передачу полученной информации на ПК. После анализа радиомодулей с возможностью поддержки протокола ZigBee была выбрана система-на-кристалле STM32108W (компании STMicroelectronics), которая представляет собой радиочастотный модуль (РЧ-модуль) и 32-разрядный микроконтроллер (МК) популярного семейства ARM CortexM3. Данная микросхема имеет компактные размеры и относительно небольшую стоимость.

Перед передачей по радиоканалу аналоговый выходной сигнал с чувствительного элемента необходимо усилить и оцифровать. Для оцифровки сигнала использовали 12-разрядный АЦП микроконтроллера STM32108W. В качестве усилителя сигнала был выбран инструментальный усилитель AD620, позволяющий одновременно усилить дифференциальную и подавить синфазную составляющую сигнала.

Координатор сети представляет собой устройство также на базе микроконтроллера STM32108W. Связь с ПК осуществляется через USB с помощью встроенного универсального асинхронного приемопередатчика (УАПП) и специализированной микросхемы преобразователя UART-USBFT232RL. Структурные схемы беспроводного сенсора и координатора сети показаны на рис. 6. В качестве источника питания (3 В) был использован литиевый элемент типоразмера CR 2032 емкостью 210 мА·ч.



Рис. 6. Структурные схемы беспроводного сенсора (а) и координатора сети (b)

Fig. 6. Block diagram of a wireless sensor (a) and network coordinator (b)



Рис. 7. Графическая оболочка программы для отображения данных с сенсора в режиме реального времени (по оси абсцисс отложено время в минутах, по оси ординат выходной сигнал с сенсора в милливольтах)

Fig. 7. Graphical shell of a software to display data from the sensor in real time mode (x-axis — time in minutes, y-axis — output signal from the sensor in millivolts)

При интервале опроса сенсоров 10 мин время работы на одном элементе составит около 180 дней.

На основе стандартной библиотеки стека ZigBee для микроконтроллера STM32W108 [10, 11] было разработано программное обеспечение, позволяющее создавать сеть топологии типа "звезда" со следующими возможностями:

- автоматическое формирование координатором беспроводной сети;
- подключение к сети нескольких устройств (от 1 до 5);
- сбор информации о значении теплового потока со всех устройств;
- возможность получать значение мощности принятого сигнала (RSSI).

Для визуализации полученных данных была разработана программа, позволяющая в режиме реального времени отображать информацию в виде временной зависимости (рис. 7). Кроме того, все полученные от сенсоров данные записываются в файл для последующей обработки.

Описание эксперимента и обсуждение результатов

Для проверки работы сети был проведен эксперимент, во время которого на два беспроводных сенсора подавали тепловой поток от испытательного стенда. Данные с обоих сенсоров передавали через координатора на мобильный ПК и записывали в файл.

Координатор во время измерения перемещали на расстояние от 0,1 до 20 м, связь оставалась стабильной в течение всего эксперимента.

Варьируя значениями теплового потока, получили преобразовательные характеристики обоих сенсоров (рис. 8).

Разный наклон полученных характеристик объясняется совокупностью геометрических и технологических параметров сенсоров: толщиной мембраны, тепловым сопротивлением отдельных элементов корпуса и др. Для получения достоверной информации о значении теплового потока каждый сенсор индивидуально калибровали.

На рис. 9 представлена временная зависимость теплового потока на испытательном стенде, снятая двумя сенсорами теплового потока. При пересчете показаний сенсоров из напряжения в плотность теплового потока применяли индивидуальные калибровочные коэффициенты, полученные значения совпали.

В течение первых 15 мин стенд выходит на стационарный режим. Инерционность обоих сенсо-



Рис. 8. Преобразовательные характеристики для двух разных беспроводных сенсоров теплового потока (1 и 2)

Fig. 8. Converting characteristics for two different wireless heat flow sensors (1 and 2)



Рис. 9. Временная зависимость теплового потока на испытательном стенде

Fig. 9. Time dependence of the heat flux on the test bench

ров гораздо меньше инерционности испытательного стенда.

Заключение

Разработан сенсор теплового потока с чувствительным элементом в виде кремниевой мембраны, изготовленной по МЭМС-технологии. Коэффициент преобразования сенсора равен 18,78 Вт/(м² · мВ), тепловое сопротивление — 0,0084 м² · К/мВ.

На основе разработанного сенсора теплового потока был спроектирован макет беспроводной сенсорной сети с топологией типа "звезда".

Данная сеть позволяет собирать информацию о значении тепловых потерь с нескольких источников и передавать ее на персональный компьютер для последующей обработки.

Кроме этого было разработано программное обеспечение, позволяющее в режиме реального времени отображать полученные данные в графической и табличной формах, и проведен эксперимент, подтверждающий работоспособность сенсорной сети.

Автор выражает благодарность проф. В. А. Гридчину за ценные советы при выполнении проекта и подготовке публикации к печати.

Список литературы

1. Вавилов В. П. Пессимистический аспект тепловизионного энергоаудита строительных сооружений // Дефектоскопия. 2010. № 12. С. 49—54.

2. Вавилов В. П. Инфракрасная термография и тепловой контроль. М.: Спектр, 2009. 544 с.

3. Пилипенко Н. В., Сиваков И. А. Метод определения нестационарного теплового потока и теплопроводности путем параметрической идентификации // Измерительная техника. 2011. № 3. С. 48—51.

4. **Кучерявый Е. В.** Беспроводные сенсорные сети и их роль в прогрессивном обществе XXI века // Информационные телекоммуникационные сети. 2006. № 2. С. 36–45.

5. Восков Л. С. Беспроводные сенсорные сети и прикладные проекты // Автоматизация и ИТ в энергетике. 2009. № 2. С. 44—49.

6. Гридчин В. А., Лобач О. В., Дикарева Р. П. Численное моделирование микроэлектронного сенсора теплового потока // Нано- и микросистемная техника. 2010. № 4. С. 13—16.

7. Гридчин В. А., Лобач О. В. Калибровка термопар сенсора плотности теплового потока // Нано- и микросистемная техника. 2012. № 9. С. 22—25.

8. Faludi R. Building Wireless Sensor Networks. O'Reilly Media, 2010. 320 c.

9. Козаченко В. Ф., Незнамов Ю. В. Перспективы использования беспроводных ZigBee-интерфейсов в электроприводе // Электронные компоненты. 2008. № 11. С. 17—24.

10. **Ember** ZNetPROZigBee® Protocol Stack Software. URL: https://www.silabs.com/products/wireless/zigbee/Pages/zigbee-software.aspx, проверено 20.03.2016

11. **UM0894** User manual STM32W-SK and STM32W-EXT starter and extension kits for STM32W108xx microcontrollers. URL: http://www.st.com/st-web-ui/static/active/en/resource/technical/document/user_manual/CD00262415.pdf

Wireless System for the Thermal Losses' Monitoring based on MEMS of a Thermal Flow Sensor

The article is devoted to the questions of construction on the basis of MEMS of a thermal flow sensor of a wireless sensor network for monitoring of the thermal losses of the devices and constructions. A radio-frequency path employs STM32W108 integrated microcircuit of the system-on-crystal (SoC) type from STMicroelectronics Co., consisting of a radio module supported by a ZigBee stack and a microcontroller with CortexM0 kernel. A breadboard model of a simple sensor network with topology of a "star" type is offered.

Keywords: MEMS, thermal flow sensor, wireless sensor networks, ZigBee

Introduction

Control of coolant flow is an important technical issue. Particular interest is in the measurement of heat fluxes and the related increase in accuracy, informativeness and measurement convenience.

The heat flux sensors and thermal imagers [1-3] are used as the measuring devices. The use of single sensors does not allow for a full analysis of the heat balance. The total solutions are feasible. For example, the use of the wireless sensor system based on thermal sensors allows to have a picture of the heat distribution and the data transmission via radio facilitates simplifies their obtainment in real time. This concept is used in "smart home" systems, where the heat consumption control devices are used along with wireless power supply management systems [4, 5].

This paper describes the practical implementation of wireless sensor network (WSN) based on silicon MEMS thermal flow sensor.

Heat flux sensor

A silicon MEMS heat flux sensor is a sensing element of heat losses. The general idea of measuring the heat losses, underlying the operation of most industrial heat flux sensor is as follows (fig. 1): the heat passes through the sensor in a given direction, the sensor material acts as an additional wall (considering the analyzed object as a base wall). The passing heat flow creates the temperature gradient in the sensor, which is registered in some way.

Most of the heat flux sensor uses a thermopile (a large number of thermocouples connected in series) as the sensitive element (SE). A single thermocouple generates an output voltage proportional to the temperature difference between the junctions. This difference, provided that the errors are excluded, is proportional to the flow of heat and depends on the thickness and thermal resistance of the sensor. Use of the large amount of thermocouples increases the output signal. Fig. 1 shows the thermopile junctions located on the hot and cold side of the sensor. A thermocouple is embedded in the base material of the sensor, usually in plastic.

The difference between the structure of MEMS heat flux sensor from classical (fig. 1), is related to the impossibility of forming of junctions of thermocouples on the opposing sides of the plate using microelectronic technology. Therefore, MEMS sensor structure (fig. 2) contains 1 SE, in which there is a temperature difference in the plane of the silicon membrane. Heat conductor 3 is used to transmit the heat flux 2, incident on all sensor top cover, to only the central part of the SE. Bottom cover 4, as well as the top, aligns the temperature on the sensor surface to the local heat fluxes did not make any significant changes in the distribution of temperature and protects the sensor from mechanical influences.

A key element of the design of the MEMS heat flux sensor [6] is SE (fig. 3), which is a shaped silicon membrane with a battery of one hundred serially connected polysilicon-aluminum thermocouples. The size of SE is 9×9 mm, the size of a thin section is 5×5 mm, the thickness of the thin portion is $12...15 \mu$ m. SE topology includes two polysilicon resistors in the center of the membrane except the thermocouples. The self-calibration of the SE sensor can be made with these resistors [7].

Fig. 4 shows a general view of the thermal flow sensor. Sensor dimensions: diameter of 28 mm, thickness of 4 mm. Conversion factor of the sensor, tested in the Siberian Scientific Research Institute of Metrology, is equal to $18,78 \text{ W/(m}^2 \cdot \text{mV})$.

Development of WSN and its software

Wireless sensor networks are one of the most promising directions of development of the telecommunication technologies. The prospects of their use are associated with replacement of the cable infrastructure to the wireless transmission and new functionality. The wireless sensor network is a distributed, self-organizing network of a plurality of sensors and actuators, integrated via radio channels.

There are many varieties of networks differ by the organization and scope. The best-known network protocols are Wi-Fi, which along with the Wireless USB is used to transfer large amounts of data (video, audio), and Bluetooth for transfer of a small amount of data for short distances. The main disadvantage of these protocols is the high power consumption.

In 2003, a group of software developers of electronic equipment developed the standard IEEE 802.15.4, that describes the principles of operation for ZigBee wireless transmission protocol. This standard took an empty niche of low-speed and almost no energy-consuming

protocols designed for longer operating time [8]. Zig-Bee protocol is specifically designed for low data rate, since data transmission from the sensors does not need a lot of speed. This protocol is characterized by high energy efficiency.

ZigBee protocol supports three types of devices:

- network coordinator who initiates the deployment of the network, controls network nodes, stores the network information;
- data collection and transmission device, usually an intelligent sensor;
- network router involved in the data exchange, as an intermediary between two network nodes.

Wireless networks based on these devices can have one of topologies shown in fig. 5 (see 4-th side of the cover).

In the topology "point-point", the data collection is organized only by one device; the topology "star" includes the coordinator, which receives information from multiple data acquisition devices. "Mesh" and "Cluster Tree" topologies have a more complex branched structure, which additionally includes routers [9]. In this paper, the WSN was selected on the basis of heat flow sensors having a "star" topology. In this case you need only one network coordinator, which will carry out information reception from the sensors and information transmission to a PC. Analyzing the radio modules with ZigBee protocol support, we used STM32108W system on chip (STMicroelectronics Company), which is a radio frequency module (RF module) and 32-bit microcontroller (MC) of the popular family of ARM CortexM3. This chip has a compact size and relatively low cost.

The analog output signal from SE is necessary to strengthen and digitize before transmission over the radio channel. To = 12-bit ADC STM32108W microcontroller was used for digitizing. An instrumental amplifier AD620, which can enhance the differential and to suppress the phase component of a signal was selected as a signal amplifier.

The network coordinator is a device based on STM32108W microcontroller. Communication with PC is organized via USB using the built-in universal asynchronous receiver-transmitter (UART) and ASIC converter UART-USBFT232RL. The circuit of a wireless sensor network coordinator is shown in fig. 6. The lithium battery of CR 2032 typewith a capacity of 210 mA \cdot h is used as power supply (3). The working timeof a one element will be about 180 days at he sensors' polling interval of 10 min.

The software that allows you to create a network topology of "star" type with the following features was developed on the base of standard ZigBee stack library for STM32W108 microcontroller [10, 11]:

- automatic generation by wireless network coordinator;
- several devices connection to network (1 to 5);

- information obtainment on the value of the heat flow from all devices;
- ability to get the value of received signal strength (RSSI).

To visualize the data, a software that allows realtime information displaying in the form of time-dependents (fig. 7) was developed. All data received from the sensors are recorded in a file for subsequent processing.

Description of the experiment and discussion of the results

To check the operation of the network, an experiment was conducted in which two wireless sensors supplied heat flux from the test stand. Data from the sensors were transmitted through the coordinator on the mobile PC and were recorded in the file.

The coordinator was moved during the measurement at a distance of 0,1 to 20 m, the connection remains stable throughout the experiment.

By varying the values of the heat flow, we got transforming characteristics of both sensors (fig. 8).

The different slope of the obtained characteristics is explained by a set of complex of geometric and technological parameters of sensors: membrane thickness, thermal resistance of individual elements of the body, etc. The each sensor was individually calibrated to obtain the reliable information about the heat flow.

Fig. 9 shows the time dependence of the heat flux at the stand, taken by two heat flux sensors. The obtained values coincided, when the individual calibration coefficients were used for recalculation of indications from voltage in to the heat flux density.

The stand comes out in the stationary mode during the first 15 min. The inertia of the two sensors is much less inertia of a test bench.

Conclusion

A thermal flow sensor from a sensitive element as a silicon membrane made by MEMS technology was developed. Conversion ratio of a sensor is equal to 18,78 W/(m² · mV), the thermal resistance - 0,0084 m² · K/mV.

The production prototype of the wireless sensor network with "star" topology was designed on the basis of the heat flux sensor.

This network allows you to collect information about the value of the heat loss from a number of sources and transfer it to a PC for further processing.

In addition, the software has been developed that allows in real-time to display the data in graphical and tabular form; an experiment confirming the performance of the sensor network was done.

The author would like to express his gratitude to prof. V. A. Gridchin for his valuable advices in the project implementation and this paper preparation.

References

 Vavilov V. P. Pessimisticheskij aspekt teplovizionnogo jenergoaudita stroitel'nyh sooruzhenij, *Defektoskopija*, 2010, no. 12, pp. 49–54. (in Russian).
 Vavilov V. P. Infrakrasnaja termografija i teplovoj kontrol'.

 Vavilov V. P. İnfrakrasnaja termografija i teplovoj kontrol'. Moscow: Spektr, 2009. 544 p. (in Russian).
 Pilipenko N. V., Sivakov I. A. Metod opredelenija nesta-

3. **Pilipenko N. V., Sivakov I. A.** Metod opredelenija nestacionarnogo teplovogo potoka i teploprovodnosti putem parametricheskoj identifikacii, *Izmeritel'naja tehnika*, 2011, no. 3, pp. 48–51. (in Russian).

4. **Kucherjavyj E. V.** Besprovodnye sensornye seti i ih rol' v progressivnom obshhestve XXI veka, *Informacionnye telekommunikacionnye seti*, 2006, no. 2, pp. 36–45. (in Russian).

5. **Voskov L. S.** Besprovodnye sensornye seti i prikladnye proekty, *Avtomatizacija i IT v jenergetike*, 2009, no. 2, pp. 44–49. (in Russian).

6. Gridchin V. A., Lobach O. V., Dikareva R. P. Chislennoe modelirovanie mikrojelektronnogo sensora teplovogo potoka,

Nano- i mikrosistemnaja tehnika, 2010, no. 4, pp. 13–16. (in Russian).

7. **Gridchin V. A., Lobach O. V.** Kalibrovka termopar sensora plotnosti teplovogo potoka, *Nano- i mikrosistemnaja tehnika*, 2012, no. 9, pp. 22–25. (in Russian).

8. Kozachenko V. F., Neznamov Ju. V. Perspektivy ispol'zovanija besprovodnyh ZigBee-interfejsov v jelektroprivode, *Jelektronnye komponenty*, 2008, no. 11, pp. 17–24. (in Russian).

9. Faludi R. Building Wireless Sensor Networks, O'Reilly Media, 2010, 320 p.

10. **EmberZNet** PRO ZigBee® Protocol Stack Software, available at: https://www.silabs.com/products/wireless/zigbee/Pages/zigbee-software.aspx

11. **UM0894** User manual STM32W-SK and STM32W-EXT starter and extension kits for STM32W108xx microcontrollers, available at: http://www.st.com/st-web-ui/static/active/en/resource/technical/document/user_manual/CD00262415.pdf technical/document/user_manual/CD00262415.pdf

УДК 621.3.049.77

Д. Л. Шлемин, канд. техн. наук, начальник отдела схемотехники, Ю. П. Лебедев, вед. инженер, В. Д. Лысь, начальник отдела топологии, ООО "СибИС", г. Новосибирск

ОБЗОР ОПЫТА РАЗРАБОТКИ СУБМИКРОННЫХ ИНТЕГРАЛЬНЫХ МИКРОСХЕМ В ООО "СибИС"

Поступила в редакцию 04.04.2016 г.

Изложен опыт разработки в ООО "СибИС" в 2006—2016 гг. субмикронных интегральных микросхем (ИМС) различного назначения, в состав которых входят аналого-цифровые; цифроаналоговые и радиочастотные сложнофункциональные блоки. Приведена информация по некоторым ИМС типа "система на кристалле" (СнК), разработанных по субмикронным КМОП-технологиям: для цифрового телевидения, для исполнительных устройств, для малогабаритных приемников сигналов навигационных спутниковых систем GLONASS/GPS, для источников вторичного электропитания высокой эффективности, а также микромощной программно-конфигурируемой ИМС с радиомодемом для сенсорных систем.

Ключевые слова: субмикронная интегральная микросхема, КМОП, аналого-цифровой преобразователь, цифроаналоговый преобразователь, система на кристалле

Введение

микросхемы Современные интегральные (ИМС), реализуемые по идеологии "система на кристалле" (СнК), представляют собой совокупность взаимосвязанных так называемых "сложнофункциональных блоков" (СФ блоков). Каждый СФ блок выполняет определенную функцию целого устройства, но при этом все СФ блоки СнК проектируются и изготавливаются на основе единой базовой технологии изготовления ИМС. Наиболее востребованными в настоящее время в производстве ИМС и оптимальными с точки зрения "качество — цена" являются субмикронные КМОП-технологии, реализованные на большинстве кремниевых фабрик мира. Одними из наиболее сложных для проектирования являются СФ блоки радиочастотных ИМС. В отличие от цифровых их разработка является технически значительно более сложной и при проектировании необходимо учитывать следующие факторы:

 технологическую зависимость аналоговых элементов, что диктует необходимость индивидуального подхода к аналоговой микросхемотехнике для каждого технологического процесса и, соответственно, к каждой фабрике-изготовите-лю ИМС;

- влияние статистических разбросов технологических параметров процесса;
- влияние паразитных эффектов топологической реализации;
- влияние функционирования цифровой части ИМС на ее аналоговую часть.

С момента своего образования в 2006 г. основным направлением деятельности ООО "СибИС" явились разработки аналого-цифровых, цифроаналоговых и радиочастотных ИМС СнК. В настоящей работе выполнен краткий обзор некоторых разработок ИМС по данному направлению в ООО "СибИС" в 2006—2015 гг. В том числе рассмотрены ИМС и макеты устройств на ее основе для приемапередачи данных по радиоканалу от сенсорных систем на основе микросистемной техники.

ИМС СнК для цифрового телерадиовещания

Разработки ИМС для цифрового телевещания включали трехканальный видеоЦАП и аудиоЦАП.



Рис. 1. Фотография топологии (*a*) и тестовой ИМС мультистандартного тюнера в условном корпусе (*b*)

Fig. 1. Photo of layout (a) and test IC for a multi-standard tuner in a conditional package (b)

Микросхемы реализованы по стандартной КМОПтехнологии с топологическими нормами 180 нм.

В работах [1—3] рассмотрены результаты проектирования и изготовления микросхемы мультистандартного видеодекодера PAL/NTSC класса "микросхема смешанного сигнала" (*mixed signal*), включающего блок цифрового модулятора и трехканальный 10-разрядный ЦАП с рабочей частотой 27 МГц.

Развитие эта тема получила в разработке микросхемы тюнера цифрового радиовещания (рис. 1) в формате DRM (*Digital Radio Mondiale*). За счет программирования полосы пропускания АЦП обеспечивается совместимость с существующими стандартами аналогового и цифрового радиовещания в диапазонах принимаемых частот 0,1...30; 66...74; 87,5...108 МГц. Созданная ИМС позволяет обеспечивать совместимость со стандартами цифрового радиовещания DRM30 (*Digital Radio Mondiale*), DRM+, AVIS (*Audio Visual Information System*), а также с существующими стандартами аналогового вещания с AM (амплитудная модуляция) и ЧМ (частотная модуляция) для использования в современных системах цифрового радиовещания.

В работе [4] приведены результаты проектирования дифференциального малошумящего КМОПусилителя, входящего в состав DRM радиотюнера. Достигнут компромисс между согласованием по входу и ростом коэффициента шума за счет использования метода шумоподавления без ущерба линейности и без ухудшения коэффициента усиления. При разработке было достигнуто низкое значение коэффициента шума в широком диапазоне частот. Характеристики дифференциального малошумящего усилителя (МШУ) удовлетворяют требованиям к применению в DRM радиотюнере: минимальное значение коэффициента шума NF 2,3 дБ; коэффициент усиления до 14,5 дБ; потребляемая мощность не более 99 мВт. Спроектированный МШУ может широко применяться при проектировании различных радиочастотных схем в составе ИМС СнК.

В работе [5] рассмотрены основные причины влияния технологических разбросов на характеристики ЦАП при проектировании по КМОП-технологии с проектно-технологическими нормами 180 нм. Предложена улучшенная схема включения матрицы генераторов тока старших разрядов при увеличении разрядности ЦАП с 10 до 14. В работе [6] рассмотрены основные причины влияния технологических разбросов на характеристики ЦАП. Разработана программа для проверки эффективности схемы перемешивания по одному из ключевых показателей работы ЦАП — интегральной нелинейности (INL). Выбрана комбинация включения матрицы с наименьшим показателем INL. Представлена характеристика интегральной нелинейности матрицы старших разрядов.

ИМС для исполнительных устройств

Описанные в настоящем разделе ИМС изготавливались по высоковольтной КМОП-технологии с топологическими нормами 180 нм. На рис. 2 показаны фотографии кристалла и электронного модуля на его основе для управления электродетонатором с электронным замедлением для инициирования промышленных взрывов в горнорудной отрасли.

Одним из важных вопросов при проектировании по высоковольтной технологии является защита выводов ИМС от воздействия электростатического разряда (ЭСР). В работе [7] рассмотрены варианты защиты от ЭСР для аналоговых и цифровых, входных и выходных контактных площадок, а также для контактных площадок питания и земли.



Рис. 2. Фотография кристалла ИМС (a) и электронного модуля (b) для управления электродетонатором с электронным замедлением Fig. 2. Photo of an IC chip (a) and an electronic module (b) for control of an electric detonator with an electronic delay

ИМС для малогабаритных приемников сигналов глобальных навигационных спутниковых систем

Разработка радиочастотной ИМС выполнена по стандартной КМОП-технологии с проектно-технологическими нормами 130 нм (рис. 3, *a*).

Микросхема предназначена для усиления, частотного преобразования и фильтрации при приеме сигналов ГЛОНАСС/GPS. Может применяться в составе малогабаритного модуля приемника навигационных сигналов глобальных навигационных спутниковых систем с низким энергопотреблением.

Микросхема представляет собой супергетеродинный приемник для приема навигационных сигналов в диапазоне частот L1: ГЛОНАСС СТ (стандартная точность) и BT (высокая точность), GPS C/A.

Управление осуществляется от внешнего специализированного процессора по шине SPI. Микросхема обеспечивает выдачу оцифрованных данных и тактовой частоты для блока коррелятора внешнего специализированного процессора.

Фотография изготовленного кристалла ИМС приведена на рис. 3, *b*.

Особенностью данной микросхемы являются: одновременный прием сигналов навигационных систем — ГЛОНАСС и GPS, возможность работы



Рис. 3. Топология кристалла радиочастотной ИМС для навигационного приемника (*a*) и фотография ИМС в условном корпусе (*b*) *Fig. 3. Layout of a chip of a radio-frequency IC for a navigation receiver* (*a*) and photo of IC in a conditional package (*b*)

с пассивными и активными антеннами, прием сигналов ВТ системы ГЛОНАСС, квантование сигналов ПЧ (промежуточная частота) внутренними 4-битными АЦП.

В состав микросхемы входят: малошумящий усилитель, квадратурный смеситель 1-й ПЧ, синтезатор частоты, полосовые фильтры ПЧ, усилитель программируемого усиления, квадратурный смеситель 2-й ПЧ, ФНЧ, ЦАП коррекции смещения, три блока 4-разрядных АЦП, сервисный 8-разрядный АЦП, программируемый источник опорного напряжения, антенный монитор.

ИМС для источников вторичного электропитания

В течение семи лет ООО "СибИС" проводил исследования и разработки в области источников вторичного электропитания высокой эффективности, основанных на использовании принципа "мягкой коммутации" силовых ключей. Результаты разработок макетов источников питания приведены в серии публикаций [9—14] и обобщены в монографии [15]. Одним из результатов проведенных работ стала разработка собственной ИМС драйвера мягкой коммутации силовых ключей, реализующего принцип коммутации, известный как Zero Voltage Switching (ZVS). Результаты разработки драйвера по высоковольтной технологии 180 нм приведены в работах [8, 16].

С конца 2014 г. ООО "СибИС" выполняет разработку серии интегральных микросхем многофункционального контроля и управления для источников вторичного электропитания для светодиодных систем по технологии BCD ("*Bipolar, CMOS, DMOS Mixed Technology*") 250 нм.

Микромощная программно-конфигурируемая ИМС типа СнК с радиомодемом для сенсорных систем

Большой интерес при построении современных интеллектуальных сенсорных систем представляет передача информации от сенсора к централизованным системам по радиоканалу. Разработанная ИМС радиомодема имеет в своем составе следующие основные СФ блоки:

- микропроцессорное ядро OpenMSP430, совместимое на уровне ассемблерных команд с MSP430;
- аналоговая периферия в виде 16-разрядного АЦП и ЦАП;
- радиомодем, который способен функционировать при минимальном использовании внешних радиочастотных цепей.

Ключевой особенностью микросхемы является минимизация потребляемой мощности во всех режимах работы микросхемы. ИМС разрабатывалась по технологии 180 нм.

Общая топология кристалла показана на рис. 4, a и включает все вышеуказанные СФ блоки, каскады ввода/вывода (контактные площадки) — в количестве 82 шт. (из которых 64 являются рабочими, а



Рис. 4. Топология кристалла тестовой ИМС радиомодема (a) и фотография ИМС в корпусе (b)

Fig. 4. Layout of a chip of a test IC for a radio modem (a), photo of IC in a package (b)

остальные — вспомогательными для более детальной оценки работы узлов ИМС), в том числе аналоговых — 14, цифровых — 62, питания — 6. Фото кристалла в корпусе приведено на рис. 4, *b*. ИМС была собрана для тестирования в 108-выводной корпус типа 4226.108-2.01.

СФ блок радиомодема имеет в своем составе следующие радиочастотные (РЧ) элементы:

- ключ прием/передача;
- LC-генератор, работающий в сверхрегенеративном режиме на прием и в режиме генерации на передачу;
- малошумящий усилитель приемника;
- усилитель мощности передатчика.

Это обстоятельство накладывало следующие дополнительные требования при проектировании топологии блока:

- минимизацию взаимодействия элементов схемы по РЧ;
- снижение потерь в ключе прием/передача в РЧ диапазоне;
- снижение уровня шумов малошумящего усилителя, проникающих через подложку.

На основе разработанной ИМС радиомодема было осуществлено макетирование устройства

приема-передачи данных по радиоканалу. Для исследования характеристик приема-передачи изготовлены два макета устройства (один для работы в режиме передатчика, второй — в режиме приемника). В ходе исследований были определены следующие основные характеристики радиомодема:

- выходное сопротивление модема со стороны антенны в режиме передачи около 30...40 Ом;
- размах напряжения (*peak-to-peak*) на выходе модема в режиме передачи без антенны 2,2 В;
- размах напряжения (*peak-to-peak*) на антенне длиной 0,5 м 1,4 В;
- входное сопротивление используемых антенн длиной 50 см на частоте 150 МГц около 37...40 Ом;
- максимальная мощность излучения не более 6 мВт;
- входное сопротивление модема со стороны антенны в режиме приема на частоте 150 МГц около 40 Ом;
- чувствительность по входу около 100 мкВ;
- фактическая дальность связи двух модемов при использовании антенны длиной 50 см на частоте 150 МГц около 100 м.

Дальнейшее развитие разработки предполагается осуществить путем перехода в частотный диапазон вплоть до 10 ГГц. Это предполагается сделать за счет следующих решений:

- использования интегральных пассивных радиочастотных элементов — индуктивностей и варикапов;
- построения сверхрегенеративного приемного тракта по более сложной и совершенной схеме со стабилизацией рабочей частоты средствами системы ФАПЧ;
- применения более совершенной схемы малошумящего усилителя приемного тракта, позволяющего получить чувствительность порядка единиц микровольта.

Реализация предложенных решений позволит:

- увеличить чувствительность приемного тракта и, следовательно, дальность работы системы;
- повысить технологичность за счет отказа от внешних критичных элементов и сопутствующей их настройке;
- уменьшить габаритные размеры антенны.

В свою очередь сказанное делает возможным реализацию концепции автономного сенсора, обеспечивающего интеллектуальную обработку аналогового сигнала, оцифровку результата и передачу его по радиоканалу.

Заключение

Приведенные в настоящем обзоре примеры полученных результатов в достаточной мере отражают опыт предприятия ООО "СибИС" в области разработок современных субмикронных интегральных микросхем типа система на кристалле. Характеристики СФ блоков разработанных ИМС приведены на сайте компании ООО "СибИС" http://www.sib-is.ru. Этот опыт, в совокупности с изложенным в настоящем сборнике опытом в области технологий МСТ, показывает возможности развития на базе предприятия работ по разработке современных сенсорных систем различного назначения.

Список литературы

1. Хабаров П. С., Шлемин Д. Л., Лысь В. Д., Лебедев Ю. П., Васильев В. Ю., Попов Ю. Н., Чепин Ю. Н. Проектирование сложнофункционального блока видеодекодера для субмикронных интегральных микросхем типа система на кристалле // Успехи современной радиоэлектроники. 2011. № 7. С. 54—59.

2. Хабаров П. С., Шлемин Д. Л., Лысь В. Д., Лебедев Ю. П., Васильев В. Ю., Попов Ю. Н. Проектирование сложнофункциональных блоков смешанного сигнала на основе субмикронной технологии на примере микросхемы видеодекодера. Часть 1. Конструкция и топология микросхемы // Вестник СибГУТИ. 2011. № 2. С. 23—34.

3. Хабаров П. С., Шлемин Д. Л., Лысь В. Д., Лебедев Ю. П., Васильев В. Ю., Попов Ю. Н. Проектирование сложнофункциональных блоков смешанного сигнала на основе субмикронной технологии на примере микросхемы видеодекодера. Часть 2. Верификация микросхемы "на кремнии" // Вестник СибГУТИ. 2011. Вып. 3. С. 3–13.

4. Шлемин Д. Л., Чернов А. С. Дифференциальный КМОП малошумящий усилитель для DRM совместимого радиотюнера // Радиопромышленность. 2012. Вып. 3. С. 66—77.

5. Карпович М. С., Лысь В. Д., Шлемин Д. Л., Лебедев Ю. П. Особенности проектирования сложнофункционального блока 14-разрядного цифроаналогового преобразователя субмикронной интегральной микросхемы типа "система на кристалле" // Вестник СибГУТИ. 2012. № 2. С. 35—45.

6. Карпович М. С., Лебедев Ю. П. Особенности проектирования топологии дифференциальных пар и токовых зеркал базовых сложнофункциональных блоков субмикронных интегральных микросхем типа "система-на-кристалле" // Вестник СибГУТИ. 2012. № 3. С. 40—49.

7. Карпович М. С., Лысь В. Д. Разработка электростатической защиты элементов ввода-вывода интегральных микросхем, выполненных по субмикронной высоковольтной КМОП-технологии // Вестник СибГУТИ, 2015. Вып. 3. С. 55—65. 8. Антонов А. А., Карпович М. С., Пичугин И. В., Васильев В. Ю. Разработка и верификация интегральной микросхемы драйвера "мягкой" коммутации силовых ключей для мощных источников электропитания // Нано- и микросистемная техника. 2015. № 9. С. 57—64.

9. Васильев В. Ю., Пичугин И. В., Козляев Ю. Д., Семенов Ю. Е., Гордиенко С. М., Фомин В. В. Источник вторичного электропитания для радиоэлектронной аппаратуры, выполненный по технологии "мягкой коммутации" ключей // Успехи современной радиоэлектроники. 2012. № 11. С. 63-70.

10. Васильев В. Ю., Козляев Ю. Д., Пичугин И. В., Семенов Ю. Е., Гордиенко С. М., Антонов А. А. Разработка источников вторичного электропитания, реализованных с использованием технологии "мягкой" коммутации ключей. Часть 1. Анализ информационных материалов и образцов источников питания // Вестник СибГУТИ. 2012. Вып. 3. С. 85—96.

11. Васильев В. Ю., Антонов А. А., Пичугин И. В., Гордиенко С. М. Разработка источников вторичного электропитания, реализованных с использованием технологии "мягкой" коммутации ключей. Часть 2. Анализ схемотехнических решений источников питания модульного типа // Вестник СибГУТИ. 2013. Вып. 1. С. 75—84.

12. Васильев В. Ю., Марков А. В., Антонов А. А., Пичугин И. В. Разработка источников вторичного электропитания, реализованных с использованием технологии "мягкой" коммутации ключей. Часть 3. Разработка макета силового модуля источника питания. / Вестник СибГУТИ. 2013. Вып. 2. С. 75—85.

13. Васильев В. Ю., Козляев Ю. Д., Семенов Ю. Е., Антонов А. А., Пичугин И. В. Разработка источников вторичного электропитания, реализованных с использованием технологии "мягкой" коммутации ключей. Часть 4. Преобразователь постоянного напряжения с формированием тока в звене инвертора // Вестник СибГУТИ. 2013. Вып. 4. С. 35—46.

14. Васильев В. Ю., Антонов А. А., Пичугин И. В., Козляев Ю. Д., Семенов Ю. Е. Разработка источников вторичного электропитания, реализованных с использованием технологии "мягкой" коммутации ключей. Часть 5. Исследование макета преобразователя постоянного напряжения // Вестник СибГУТИ. 2014. Вып. 1. С. 64—74.

15. **Источники** вторичного электропитания с "мягкой" коммутацией силовых ключей / Под ред. Ю. Д. Козляева. Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2014.

16. Антонов А. А., Карпович М. С., Пичугин И. В., Курленко А. А., Васильев В. Ю. Интегральная микросхема драйвера "мягкой" коммутации силовых ключей для мощных источников электропитания // Нано- и микросистемная техника. 2014. № 6. С. 37—42.

D. L. Shlemin, Ph. D., Head of Section, Yu. P. Lebedev, Principal Engineer, V. D. Lys, Head of Section SibIS LLC, Novosibirsk

Review of SIBIS Experience in Development of the Submicron Integrated Microcircuits

The authors present the experience of SibIS LLC. obtained in 2006–2016 in development of the field submicron integrated microcircuits (IC) for various purposes, comprising analog to digital and digital to analog converters and radio-frequency complex functional units. They also present information on certain system-on-chip IMC developed by submicron CMOS technologies for digital TV, compact GLONASS/GPS receivers, highly efficient sources of the secondary power supplies, and micro-power program-con-figurated IMC with a radio modem for the sensor systems.

Keywords: submicron integrated microcircuit, CMOS, analog to digital converter, digital to analog converter, system-on-chip

Introduction

Integrated microcircuits, realized on the system-onchip (SoC) principle represent a set of interconnected "complex functional units" (CF units). Each CF unit carries out a certain function of the whole device, but, at that, all the CF units are designed and made on the basis of a single base IMC manufacturing technology. The most demanded for the IC manufacture and optimal from the point of view of "the quality-price ratio" are the submicronic CMOS technologies realized in most of the silicon factories. The most difficult for designing are the CF units of the radio-frequency IC. But their development is more complex, than that of the digital ones, and should take into account the following factors:

- technological dependence of the analogue elements, which dictates the necessity of an individual approach to the analogue microcircuitry for each technological process and, accordingly, to each factorymanufacturer of IC;
- influence of the statistical dispersion of the technological parameters; influence of the parasitic effects of the layout realization;
- influence of functioning of the digital part of IC on its analogue part.

From the moment of its establishment in 2006, the basic direction of activity of SibIS Company was development of the analogue-digital, digital-analogue and radio-frequency SoC IC. This work contains a brief review of certain IC developments in the given direction of SibIS LLC in 2006—2015. Among them are IC and breadboard models of the devices on its basis for data reception-transmission via a radio channel from the sensor systems based on microsystem technologies.

IC SoC for digital TV-radio broadcasting

IC developments for digital telecasting included three-channel video digital to analog converter and audio digital to analog converter. The microcircuits were realized by the standard CMOS technology with the technology design rule of 180 nm.

In [1–3] the authors consider the results of designing and manufacturing of the microcircuit of PAL/NTSC multi-standard video decoder of the mixed signal class, including a digital modulator unit and a three-channel 10-digit digital to analog converter with the working frequency of 27 MHz.

The topic was developed further in the microcircuit for a digital broadcasting tuner (fig. 1) in DRM (Digital Radio Mondiale) format. Due to programming of the pass-band of the analog-to-digital converter a compatibility was achieved with the existing standards of the analogue and digital broadcasting within the bands of the received frequencies of 0,1...30; 66...74; 87,5...108 MHz. The developed IC allows us to ensure compatibility with the following digital broadcasting standards: DRM30 (Digital Radio Mondiale), DRM+, AVIS (AudioVisual Information System), and also with the existing standards of the analogue broadcasting with AM (amplitude modulation) and FM (frequency modulation) for use in the systems of digital broadcasting.

In [4] the authors present the results of designing of differential CMOS for a low-noise amplifier, a part of DRM radio tuner. A compromise was achieved between the coordination on the input and growth of the noise coefficient due to the use of the noise reduction, without a damage to linearity and deterioration of the amplification coefficient. The development demonstrated a low noise coefficient in a wide range of frequencies. Characteristics of the differential low-noise amplifier (LNA) meet the requirements of DRM radio tuner: minimal noise coefficient — NF 2,3 dB; amplification coefficient up to 14,5 dB; power consumption not more than 99 mW. The designed LNA can be widely applied for designing of the radio-frequency circuits within IC SoC structure.

In [5] the authors consider the principal causes of the influence of the technology dispersions on characteristics of the digital to analog converter during designing by CMOS technology with the standards of 180 nm. An improved circuit was proposed for inclusion of a matrix of generators of the current of high-order position during an increase of the number of digits of a digital to analog converter from 10 up to 14. In [6] the reasons are considered of the influence of the technology dispersions on characteristics of a digital to analog converter. A program was developed for control of the efficiency of the mixing circuit by one of the key indicators of operation of a digital to analog converter integrated nonlinearity (INL). A combination was chosen for inclusion of a matrix with the lowest indicator of INL. A characteristic of the integrated nonlinearity of a matrix of the high-order position was presented.

IC for the actuating devices

The described IC was made by high-voltage CMOS technology with the technology design rule of 180 nm. Fig. 2 presents photos of a chip and an electronic module on its basis for control of an electric detonator with electronic delay for initiation of industrial explosions in the mining branch.

One of the important questions for designing on the basis of a high-voltage technology is protection of the IC outlets against the influence of an electrostatic discharge (ESD). In [7] the authors consider versions of protection from ESD for the analogue and digital, input and output contact platforms, and also for the contact platforms of the power supply and the ground.

IC for small-sized receivers of signals of the global navigation satellite systems

Development of radio-frequency IC was implemented by a standard CMOS technology with technology design rule of 130 nm (fig. 3, a).

The microcircuit is intended for amplification, frequency transformation and filtration of the signals received from GLONASS/GPS. It can be applied as a part of a small-sized module of a receiver of the navigation signals from the global navigation satellite systems with low energy consumption.

The microcircuit is a superhet receiver of the navigation signals within the range of frequencies L1: GLO-NASS SA (standard accuracy) and HA (high accuracy), GPS C/A.

The control is carried out from an external special processor via SPI bus. The microcircuit delivers the digitized data and clock frequency for the correlator unit of the external special processor.

Photo of the manufactured IC chip - (fig. 3, b).

The specific features of the given microcircuit are simultaneous reception of signals from the navigation systems — GLONASS and GPS, possibility of operation with the passive and active aerials, reception of HA signals from GLONASS system, and quantization of the intermediate frequency signals by the internal 4-bit analog-to-digital converters.

It comprises: a low-noise amplifier, a quadrature mixer of the 1st IF, a frequency synthesizer, IF strip filters, a programmed amplifier, a quadrature mixer of the 2nd IF, low-pass filter, DAC for displacement corrections, three units of 4-digit ADC, service 8-digit ADC, a programmed source of the reference voltage, and an antenna monitor.

IC for the sources of the secondary power supplies

Within seven years SibIS LLC carried out R & D works in the field of the sources of the high efficiency secondary power supplies based on the principle of "soft switching" of the power keys. The results of R & D of the breadboard models of the power supplies are presented in [9–14] and generalized in [15]. One of the results was development of the own IC of the soft switching driver for the power keys, realizing the principle of Zero Voltage Switching (ZVS). The results of development of the driver based on a high-voltage technology of 180 nm are presented in [8, 16].

Since the end of 2014 SibIS LLC has carried out development of IC of a multipurpose control for the sources of the secondary power supplies for the lightemitting diode systems based on BCD technology (Bipolar, CMOS, DMOS Mixed Technology) of 250 nm.

Micropowerful program-configured IC of SoC type with a radio modem for the sensor systems

In construction of the intellectual sensor systems of big interest is the information transfer from a sensor to the centralized systems via a radio channel. The developed radio modem IC comprises the following main CF units:

- openMSP430 microprocessor kernel compatible with MSP430 at the level of the assembler commands;
- analogue periphery in the form of 16-digit ADC and DAC;
- radio modem, capable to function with a minimal use of the external radio-frequency circuits.

The key feature of the microcircuit is minimization of the power consumption in all the operating modes. IC was developed on the basis of 180 nm technology.

The chip layout is presented in fig. 4, *a* and includes the above-mentioned CF units, input/output elements (I/O pads) — total number — 82 I/O pads (64 are the working ones, and the rest are the auxiliary ones for a more detailed assessment of operation of the IMC nodes), including analogue ones — 14, digital ones — 62, power supply ones — 6. A photo of the chip in a package is presented in fig. 4, *b*. IC was assembled for testing in 108-package of 4226.108-2.01.

The CF radio modem unit comprises the following radio-frequency (RF) elements:

- reception/transmission key;
- LC generator working in a super-regenerative mode for reception and in a generation mode for transmission;
- low-noise receiver amplifier;
- transmitter amplifier.

This circumstance imposed the following additional requirements to designing of the unit layout:

- minimization of interaction of the circuit elements on RF;
- decrease in losses in the reception/transmission key in the RF range;
- decrease of the level of noises from the low-noise amplifier, penetrating through a substrate.

On the basis of the developed radio modem IC a prototyping of the device for the data reception-transmission via a radio channel was carried out. For research of their characteristics two breadboard models of the device were made (for operation in the transmitter mode and in the receiver mode). During the research the following basic characteristics of the radio modem were defined:

- output resistance of the modem from the aerial side in the transmission mode was about 30...40 Ω;
- peak-to-peak voltage on the modem output in the transmission mode without the aerial was 2,2 V;
- peak-to-peak voltage on the aerial with the length of 50 cm was 1,4 V;

- the input resistance of the used aerials with the length of 50 cm on the frequency of 150 MHz was about 37...40 Ω;
- the maximal radiation power was not more than 6 mW;
- the input resistance of the modem from the aerial side in the reception mode on the frequency of 150 MHz was about 40 Ω;
- sensitivity on the input was about 100 μ V;
- actual communication range of the two modems with the used aerial length of 50 cm and frequency of 150 MHz was about 100 m.

The further development of the technology envisages transition to the frequency range up to 10 GHz. This is expected to be implemented due to the following solutions:

- use of the integral passive radio-frequency elements — inductances and varicaps;
- constructions of a super-regenerative reception path by a more complex and sophisticated circuit with stabilization of the working frequency by means of PLL system;
- application of an improved circuit of a low-noise amplifier for the reception path, allowing to ensure sensitivity of about units of μV .
 - Realization of the proposed solutions will allow:
- to increase the sensitivity of the reception path and range of work of the system;
- to raise the adaptability to manufacture due to exclusion of the external critical elements and their accompanying adjustment;
- to reduce the aerial dimensions.

In its turn the above makes possible realization of the concept of an independent sensor ensuring intellectual processing of the analogue signal, digitization of the results and its transfer via a radio channel.

Conclusion

The examples of the results presented in the review reflect the experience of SibIS Ltd. in the field of development of modern submicron IC of the systemon-chip. The characteristics of the CF units of the developed IC are presented on the website http:// www.sib-is.ru. This experience, in combination with the experience stated in the collected articles in the area of microsystem technologies, demonstrates opportunities for development on the basis of the enterprise of the works for elaboration of the sensor systems for various purposes.

References

1. Khabarov P. S., Shlemin D. L., Lys V. D., Lebedev Yu. P., Vasilyev V. Yu., Popov Yu. N., Chepin Yu. N. Proektirovaniye sloshno-funkcionalnogo bloka videodekodera dlyz submikronnih integralnih mikroshem tipa sistema na kristalle, *Uspekhi sovremennoi radioelektroniki*, 2011, no. 7, pp. 54–59. (In Russian).

2. Khabarov P. S., Shlemin D. L., Lys V. D., Lebedev Yu. P., Vasilyev V. Yu., Popov Yu. N. Proektirovaniye sloshno-funkcionalnih blokov smescjannogo signala na osnove submikronnoi tehnologii na primere mikroshemi videodekodera. Chast 1. Konstrukciya i topologiya mikroshemi, *Vestnik SibGUTI*, 2011, no. 2, pp. 23–34. (In Russian).

3. Khabarov P. S., Shlemin D. L., Lys V. D., Lebedev Yu. P., Vasilyev V. Yu., Popov Yu. N. Proektirovaniye sloshno-funkcionalnih blokov smescjannogo signala na osnove submikronnoi tehnologii na primere mikroshemi videodekodera. Chast 2. Verifikaciya mikroshemi "na kremnii", *Vestnik SibGUTI*, 2011, no. 3, pp. 3–13. (In Russian).

4. Shlemin D. L., Chernov A. S. Differencialnii CMOS maloschumyaschii usilitel dlya DRM sovmestimogo radio tunera, *Radiopromischlennoct*, 2012, no. 3, pp. 66–77. (In Russian).

5. Karpovich M. S., Lys V. D., Shlemin D. L., Lebedev Yu. P. Osobennosti proektirovaniya sloshno-funkcionalnogo bloka 14-razryadnogo cifro-analogovogo preobrazovatelya submikronnoi integralnoi mikroshemi tipa "sistema na kristalle", *Vestnik SibGUTI*, 2012, no. 2, pp. 35–45. (In Russian).

6. **Karpovich M. S., Lebedev Yu. P.** Osobennosti proektirovaniya topologii differencialnij par I tokovih zerkal bazovih sloshno-funkcionalnih blokov submikronnih integralnij mikroshem tipa "sistema na kristalle, *Vestnik SibGUTI*, 2012, no. 3, pp. 40–49. (In Russian).

7. **Karpovich M. S., Lys V. D.** Razrabotka elektrostaticheskoi zaschiti elementov vvoda-vivoda integralnij mikroschem, vi polnennih po submikronnoi visokovoltnoi CMOS technologii, *Vestnik SibGUTI*, 2015, no. 3, pp. 55–65. (In Russian).

8. Antonov A. A., Karpovich M. S., Pichugin I. V., Vasilyev V. Yu. Razrabotka I verifikaciya integralnoi mikroschemi draivera myagkoi kommutacii silovih klyuchei dlya moschnih istochnikov elektropitaniya, *Nano- i mikrosistemnaya technika*. [J. NANO and MICROSYSTEM], 2015, no. 9, pp. 57–64. (In Russian).

9. Vasilyev V. Yu., Pichugin I. V., Kozlyaev Yu. D., Semenov Yu. E., Gordienko S. M. Fomin V. V. Istochnik vtorichnogo elektropitaniya dlya radioelektronnoi apparaturi, vipolnennii po technologii "myagkoi kommutacii" klyuchei, *Uspekhi sovremennoi radioelektroniki*, 2012, no. 11, pp. 63–70. (In Russian).

10. Vasilyev V. Yu., Kozlyaev Yu. D., Pichugin I. V., Semenov Yu. E., Gordienko S. M. Antonov A. A. Razrabotka istochnikov vtorichnogo elektropitaniya, realizovannih c icpolzovaniem technologii "myagkoi" kommutacii klyuchei. Chast 1. Analiz informacionnih materialov I obrazcov istochnikov pitaniya, *Vestnik SibGUTI*, 2012, no. 3, pp. 85–96. (In Russian).

11. Vasilyev V. Yu., Antonov A. A., Pichugin I. V., Gordienko S. M. Razrabotka istochnikov vtorichnogo elektropitaniya, realizovannih c icpolzovaniem technologii "myagkoi" kommutacii klyuchei. Chast 2. Analiz schemotechnicheskih reschenii istochnikov pitqaniya modulnogo tipa, *Vestnik SibGUTI*, 2013, no. 1, pp. 75–84. (In Russian).

 Vasilyev V. Yu., Markov A. V., Antonov A. A., Pichugin I. V. Razrabotka istochnikov vtorichnogo elektropitaniya, realizovannih c icpolzovaniem technologii "myagkoi" kommutacii klyuchei. Chast 3. Razrabotka maketa silovogo modulya istochnika pitaniya, *Vestnik SibGUTI*, 2013, no. 2, pp. 75–85. (In Russian).
 13. Vasilyev V. Yu., Kozlyaev Yu. D., Semenov Yu. E., An-

13. Vasilyev V. Yu., Kozlyaev Yu. D., Semenov Yu. E., Antonov A. A., Pichugin I. V. Razrabotka istochnikov vtorichnogo elektropitaniya, realizovannih c icpolzovaniem technologii "myagkoi" kommutacii klyuchei. Chast 4. Preobrazovatel postoyannogo napryasheniya s formirovaniyem toka v zone invertora, *Vestnik SibGUTI*, 2013, no. 4, pp. 35–46. (In Russian).

14. Vasilyev V. Yu., Antonov A. A., Pichugin I. V., Kozlyaev Yu. D., Semenov Yu. E. Razrabotka istochnikov vtorichnogo elektropitaniya, realizovannih c icpolzovaniem technologii "myagkoi" kommutacii klyuchei. Chast 5. Issledovaniye maketa preobrazovatelya postoyannogo napryasheniya, *Vestnik SibGUTI*, 2014, no. 1, pp. 64–74. (In Russian).

15. Istochniki vtorichnogo elektropitaniya s "myagkoi" kommutaciei silovih klyuchei. Ed. Kozlyaev Yu.D. Novosibirsk, SB RAS Publishing House, 2014, 113 p.

16. Antonov A. A., Karpovich M. S., Pichugin I. V., Kurlenko A. A., Vasilyev V. Yu. Integralnaya mikroschema draivera "myagkoi" kommutacii silovih klyuchei dlya moschnih istochnikov elektropitaniua, *Nano- i mikrosistemnaya technika*. [J. NANO and MICROSYSTEM], 2014, no. 6, pp. 37–42. (In Russian).

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

УДК 546.96 + 539.2 + 544.03 + 543.51 + 544.4

В. Ю. Васильев, д-р хим. наук, проф. Новосибирский государственный технический университет, зам. Генерального директора ООО "СибИС", г. Новосибирск, e-mail: vasiliev@sib-is.ru

СВЕРХТОНКИЕ ПЛЕНКИ МЕТАЛЛОВ ПЛАТИНОВОЙ ГРУППЫ ДЛЯ ПРИМЕНЕНИЯ В НАНО- И МИКРОТЕХНОЛОГИЯХ

Поступила в редакцию 04.04.2016 г.

Рассмотрена совокупность вопросов получения методами осаждения из газовой фазы сверхтонких проводящих пленок металлов платиновой группы (Ru, Rh, Pd, Os, Ir, Pt) для их применения в нано- и микротехнологиях. Показано, что ключевым фактором роста сплошных пленок с хорошей электропроводностью является нуклеация пленок на первых этапах их формирования. Проанализированы особенности применения озона в качестве второго реагента процессов осаждения. Проанализированы направления дальнейших исследований, в том числе необходимость изучения поверхностных процессов на первых этапах атомно-слоевого осаждения пленок металлов.

Ключевые слова: тонкие пленки, атомно-слоевое осаждение, металлы платиновой группы, реагенты-предшественники, нуклеационная задержка, озон

Введение и постановка задачи

Тонкопленочные материалы являются основой современных электронных компонентов, изготавливаемых с помощью нано- и микротехнологий. Тонкие пленки (ТП) получают преимущественно с помощью метода химического осаждения из газовой фазы (ХОГФ, по зарубежной терминологии — *Chemical Vapor Deposition*, CVD) [1—3]. В ходе ХОГФ на поверхности образца, нагретого до желаемой температуры, происходит рост тонкой пленки благодаря необратимым химическим реакциям исходных реагентов, так что ХОГФ дает возможность точного контроля параметров процессов и, следовательно, толщины, состава, структуры и свойств тонких пленок. Для ХОГФ металлических пленок используется также термин "термораспад металлоорганических соединений" (Metal-Organic CVD, MOCVD) [4].

Существенным преимуществом метода ХОГФ в сравнении с иными методами создания ТП является возможность получения конформных пленок на сложных трехмерных структурах разнообразной формы. Трехмерные структуры упрощенно описываются элементами рельефа прямоугольной формы и их так называевым аспектным отношением (AO), т.е. отношением высоты к ширине элемента. Под конформностью подразумевается эквивалент-

ность толщины созданной тонкой пленки на всей поверхности сложного рельефа. Получение конформных покрытий — сложная задача, решаемая, например, в микроэлектронике многие годы по мере усложнения рельефов интегральных микросхем [2, 3]. На таких сложных рельефах иные методы создания покрытий, например напыление, неприемлемы. Для достижения конформного осаждения пленок на структурах с большими АО применяют импульсные методы ХОГФ. В таких процессах исходные химические реагенты вводят в реакционные камеры короткими последовательными импульсами. При этом импульсы реагентов разделяют импульсами инертного газа, очищающего реакционную камеру от остатков предыдущего реагента. Таким образом, импульсные процессы являются циклическими. Их длительность измеряется числом циклов осаждения, а скорость наращивания тонкой пленки определяется в расчете на один цикл осаждения. Основной пленкообразующий реагент ХОГФ часто называют предшественником (или прекурсором, precursor). Для некоторых реагентов-предшественников и реализации ХОГФ в узком низкотемпературном диапазоне реализуется режим поверхностной реакции. Его часто называют монослойным осаждением или атомно-слоевым осаждением (АСО) (по зарубежной терминологии — Atomic Layer Deposition, ALD) [5]. Хронология и итоги исследований и развития метода ХОГФ для различных тонкопленочных покрытий применительно к микроэлектронным технологиям рассмотрены в работах [2, 3].

В последние годы тонкие пленки металлов платиновой группы (МПГ) — Ru, Rh, Pd, Os, Ir, Pt вызывают все больший интерес с точки зрения применения в современных прецизионных технологиях. Эти металлы имеют высокие температуры плавления, хорошую электропроводность, высокую устойчивость к химическим реагентам и окислительным процессам. Из МПГ особый интерес вызывают тонкие пленки рутения [6], иридия [7], а также платины [8], полученные методами ХОГФ. Кроме того, рутений и иридий имеют хорошо проводящие оксиды (например, RuO₂, IrO₂), что делает их привлекательными для использования в технологии микроэлектроники с многочисленными окислительными процессами по ходу изготовления приборов.

Например, рутенийсодержащие ТП первоначально рассматривали как возможный материал для использования в качестве электрохимических электродов [9], контактов [10], металлизации в многоуровневых интегральных микросхемах [11]. В начале XXI столетия в микроэлектронной технологии с проектно-технологическими нормами менее 100 нм рутений исследовали для применения в качестве электродов в конденсаторных ячейках памяти типа metal-insulator-metal, MIM (металлизолятор-металл) [12]. Рутений также рассматривали в качестве материала для затвора транзисторов [13], в качестве барьерных слоев [14], а также проводящих затравочных слоев для так называемой медной многослойной металлизации интегральных микросхем путем электроосаждения [15]. Помимо указанных выше, рутений и другие металлы группы рассматривались для различных нанотехнологических применений (см. некоторые примеры в работах [16-23]). По совокупности литературных данных ТП МПГ рассматриваются в современных прецизионных устройствах главным образом как проводящие материалы, например для электродов различных устройств. При этом большой интерес представляет возможность их использования при повышенной температуре.

Основным практически необходимым свойством металлических покрытий является их электропроводность. Известна тенденция к масштабированию всех элементов современных нано- и микроэлектронных прецизионных устройств. Применительно к ТП проводникам это означает снижение их толщины до нанометровых значений при сохранении требований к высокой электропроводности, в том числе — на сложных трехмерных структурах устройств.

Проблема при осаждении МПГ состоит в том, что сверхтонкие пленки металлов обнаруживают несплошность и неприемлемо высокое электри-



Рис. 1. Типичные зависимости поверхностного сопротивления слоев рутения от длительности циклов импульсного процесса осаждения при температуре 290 $^\circ C$

Fig. 1. Dependences of the surface resistance of the ruthenium layers on the duration of the cycles of the impulse deposition process at temperature 290 $^\circ\mathrm{C}$

ческое сопротивление. Пример на рис. 1 иллюстрирует проблему электропроводности для случая импульсного ХОГФ тонких пленок рутения [24]. При этом сплошные слои при температуре 290 °С формировались при числе импульсов более 30.

До настоящего времени каких-либо обобщений исследований относительно электропроводимости сверхтонких МПГ опубликовано не было. В данной работе систематизирована информация о влиянии условий осаждения на структуру и электрическое сопротивление тонких пленок МПГ. Такая информация позволяет определить направления дальнейших исследований в области синтеза сверхтонких сплошных металлических проводящих слоев для нужд нано- и микротехнологий.

Общая характеристика процессов осаждения тонких пленок

Сложности реализации процессов ХОГФ для ТП МПГ можно сгруппировать следующим образом.

Многообразие применяемых реагентов-предшественников. Исходные реагенты относятся к различным классам химических веществ и содержат разнообразные функциональные группы, включающие углерод, водород, кислород и другие элементы. Например, в работах [24, 25] охарактеризовано получение ТП рутения из карбонила $Ru_3(CO)_{12}$, ацетилацетоната рутения $Ru(C_5H_7O_2)_3$, рутеноцена $Ru(C_5H_5)_2$ и их производных, а также из азот- и фосфорсодержащих реагентов. Для случая иридия помимо перечисленных классов исходных реагентов использовали еще и галогенсодержащие реагенты IrCl₃, IrCl₄, IrBr₃, IrF₆. Аналогичное положение имеет место и для других МПГ.

Многообразие используемых вторых реагентов. Процессы термораспада часто выполняют в вакуу-

ме, в инертной или в восстановительной среде (как правило, в водороде). Это позволяет предотвратить окисление осаждаемого металла. Однако проблемой в этом случае является неполный термораспад органических групп и внедрение в ТП примеси углерода с концентрацией до десятков атомных процентов, а также азота и водорода. Углерод существенно ухудшает структуру, физико-химические и электрические свойства тонких пленок металлов. Применение окислительных сред (молекулярный кислород, азот-кислородные смеси, оксиды углерода и азота, пары воды и т.д.) дает возможность повысить полноту окисления реагентов-предшественников. При этом формируются летучие побочные продукты реакций и в ТП снижаются концентрации нежелательных элементов (С, Н, N). Ввиду риска формирования нежелательных оксидных фаз осаждаемого металла требуется тщательная оптимизация соотношения окислителя к исходному реагенту-предшественнику.

В последние годы для ХОГФ МПГ были исследованы комбинации вторых реагентов, позволяющие в ходе синтеза ТП очищать ее от нежелательных примесных элементов. Например, в работе [25] помимо одиночных вторых реагентов для получения ТП рутения из $Ru(CO)_3(C_6H_8)$ в ходе импульсного ХОГФ использовали последовательности импульсов окислителя (N₂O) и восстановителя (NH₃). В работе [26] в качестве перспективного способа получения ТП методом АСО было предложено использовать озон и так называемый двойной второй реагент, а именно — последовательность O₃ - H₂. Такой прием позволяет удалять из ТП нежелательные элементы и улучшать структуру пленок и снижать их электрическое сопротивление.

Многофакторность условий процессов осаждения. Процессы ХОГФ проходят при различных условиях (обычно варьируется температура, давление, скорости подачи реагентов в реактор и концентрации реагентов и т.д.). Определяющим фактором является температура ХОГФ T_d . Например, в работе [25] было показано, что при импульсном ХОГФ рутения из Ru(CO)₃(C₆H₈) "переломной" температурой осаждения является $T_d = 200$ °C (рис. 2, a-c).



Рис. 2. Обобщенные зависимости изменения скорости осаждения (a), плотности пленки (b) и удельного сопротивления (c) для рутения от температуры осаждения (по данным [9]) Fig. 2. Generalized dependences of the change of the deposition rate (a), film density (b) and specific resistance (c) for ruthenium on the deposition temperature (by data of [9])



Рис. 3. Примеры морфологии поверхности образцов рутения, выращенных на поверхности образца монокремния с термическим диоксидом кремния без рельефа (a, b), с рельефом (c, d), и на затравочных слоях Pt-Pd (b, d)

Fig. 3. Examples of the morphology of the surface of the ruthenium samples grown on the surface of the monocrystalline silicon sample with the thermal dioxide of silicon without a relief (a, b), with a relief (c, d) and on the seed layers of Pt-Pd (b, d)

При $T_d < 200$ °C процесс роста пленки оказался замедленным ввиду длительных нуклеационных задержек (под нуклеацией, или зародышеобразованием, понимается поверхностная концентрация и размер зерен ТП). Пленки вырастали крупнозернистыми (рис. 3, *a*), рыхлыми, с малой плотностью. Улучшение структуры пленки имело место при повышении давления реагентов при ХОГФ. Это позволяло, по-видимому, повышать заполнение поверхности молекулами исходного реагента-предшественника. При этом крупные зерна в пленках рутения состояли из нанокристаллитов с оценочными размерами около 5 нм [9] (см. рис. 3, а). Такие размеры оказались близкими к размерам нанокристаллитов 3-4 нм, найденным в работе [27] для пленок рутения, полученных из другого реагента — ацетилацетоната рутения $Ru(C_5H_7O_2)_3$.

При $T_d > 200$ °С закономерности процесса роста рутения следовали схемам процессов роста ТП, проанализированным в работе [2]. Свойства и электросопротивление ТП рутения были приемлемыми, однако конформность покрытий на ступенчатых рельефах была неудовлетворительной.

Влияние сложности рельефа образца. Общие вопросы роста ТП на сложных рельефах трехмерных полупроводниковых структур рассмотрены в работе [2]. Для металлических пленок необходимо принимать во внимание возможность различия структуры на рельефе образца (см. рис. 2, *c*). При замедленной нуклеации внутри рельефа могут вы-

растать отдельные зерна. В итоге металлические покрытия будут иметь разрывы на рельефе, вызывающие потерю электропроводности ТП. Для улучшения конформности необходимо снижать температуру осаждения во избежание протекания нежелательных химических реакций в газовой фазе [2]. Однако снижение T_d влияет на ростовые характеристики процессов ХОГФ и свойства ТП (см. рис. 2, a-c). Влияние на начальные стадии формирования тонкой металлической пленки свойств поверхности образца. Состояние поверхности образца оказывает ключевое влияние на ростовые характеристики МПГ. В работе [25] показано, что в области "плато" на рис. 2, *а*, характер зародышеобразования рутения сильно отличался для разных поверхностей образцов. Так, наихудшая нуклеация отмечалась для образцов нитрида кремния Si_3N_4 на кремнии, наилучшая нуклеация — для образцов с оксидами алюминия Al_2O_3 и гафния HfO_2 , полученными методом ACO на кремнии. Для монокристаллического кремния Si и диоксида кремния SiO_2 нуклеация практически не отличалась, что было объяснено наличием естественного оксида на поверхности кремния.

Однако на поверхности субнанометровых (~0,8 нм) напыленных затравочных слоев (3С) МПГ (наиболее удобным был выбран сплав 70 % Pt — 30 % Pd) пленки рутения формировались принципиально иначе (рис. 3, *b*). Даже при толщинах <10 нм, в том числе на трехмерных структурах при пониженной температуре осаждения, пленки рутения были сплошными. Они состояли из нанокристаллитов с оценочными размерами около 5 нм и имели шероховатость поверхности <1 нм. Применение 3С позволило существенно снизить температуру осаждения ТП рутения и повысить скорости осаждения W_d (рис. 4, *a*).

При этом низкотемпературные ТП рутения на затравочных слоях обнаруживали существенно более низкое электросопротивление (см. сравнение на рис. 4, *b*). Однако улучшение нуклеации на самом первом этапе формирования пленки не





Fig. 4. Dependences of the deposition rate (a) and the specific resistance (b) for the ruthenium films on the seed layers of Pt-Pd with the use of $Ru(CO)_3(C_6H_8)$ and the second reagents (MOCVD, NH₃, N₂O, H₂). The dotted line shows the sample without a seed layer



Рис. 5. Упрощенные схемы роста пленок металлов (Ме) и оксидов металлов (MeO_x) платиновой группы при высокой и низкой температурах ACO из разных прекурсоров и разных вторых реагентов

Fig. 5. Simplified schemes of the growth of the films of metals (Me) and metal oxides (MeO_x) of the platinum group at high and low temperatures of ALD from different precursors and different second reagents

привело к снижению сопротивления до значений, характерных для металлического рутения (около 7 мкОм · см). Это было объяснено влиянием на нуклеацию других факторов, прежде всего — примесей углерода и кислорода в ТП. Нуклеационные и ростовые особенности формирования ТП МПГ обобщены в следующим разделе.

Рост тонких пленок МПГ. Краткий обзор

На нуклеацию и, следовательно, на электропроводность ТП МПГ оказывают влияние все факторы, перечисленные в предыдущем разделе. Вопросы и приемы улучшения нуклеации МПГ рассматривались многими авторами [6, 7, 24, 25]. Однако предлагаемые ими решения оказались малоэффективными, особенно при работе с высокоаспектными структурами.

В настоящее время единственным экспериментально подтвержденным обнадеживающим вариантом улучшения нуклеации при АСО МПГ является использование озона. Его применяют либо для проведения предварительной обработки поверхности образцов перед началом осаждения, либо в качестве второго реагента. Материалы работы [26] позволили предложить обобщенную схему процессов получения ТП МПГ (рис. 5). Схема приемлема для большинства использованных реагентов-предшественников.

При $T_d > 200$ °С можно получать качественные ТП МПГ с использованием кислорода в качестве второго реагента. Применение озона позволяет значительно улучшить нуклеацию на первых этапах формирования и роста ТП при $T_d < 200$ °С. По-видимому, озон улучшает условия для термораспада реагентов-предшественников и позволяет формироваться свободным от примесей углерода зародышам МПГ. Следующий за импульсом озона импульс водорода (фактически это означает применение двойного второго реагента) позволяет удалить оксидную фазу из свежеосажденной металлической ТП. Таким образом, водород играет роль восстановителя частично окисленной озоном поверхности зародышей МПГ.

Кратко рассмотрим основные фактические экспериментальные результаты, полученные для пленок иридия и платины с применением озона.

Тонкие пленки иридия с помощью АСО получали из двух реагентов-предшественников.

В работе [28] пленки иридия выращивали методом ACO из ацетилацетоната иридия $Ir(C_5H_7O_2)_3$, $(ganee Ir(acac)_3)$, озона и молекулярного водорода при температурах 165...200 °С. АСО проводили с использованием последовательной импульсной подачи газов O₃ — H₂: Ir(acac)₃—продувка—O₃—продувка-Н2-продувка. Скорость осаждения составляла 0,02 нм/цикл с небольшой нуклеационной задержкой (рис. 6, а). Анализ показал, что после 100 циклов осаждения (что соответствовало эффективной толщине покрытия около 2 нм), пленки были несплошными. После 200 циклов (толщина 5 нм) в пленках оставались пустоты, однако после 300 циклов (толщина 7 нм) пленки выглядели сплошными, но их проводимость была ненадежной. Пленки толщиной 60 нм имели низкое удельное сопротивление (менее 12 мкОм · см) и шероховатость 1,4 нм. Примесями в пленке были водород с концентрацией 2 ат. %, углерод — 1 ат. % и кислород — 4—7 ат. %. На ступенчатых структурах высотой 1200 нм с зазором 150 нм (АО = 8) были получены конформные пленки иридия при температуре 165 °C.

Позднее те же авторы в работах [29, 30] исследовали рост пленок иридия и оксида иридия методом ACO при низких температурах с использованием предшественника метилциклопентадиенилциклогексадиен иридия $Ir(CH_3C_5H_5)(C_8H_{12})$, далее Ir(MeCp)(CHD). В первой из цитирован-



Рис. 6. Сравнительные данные для осаждения пленок иридия с использованием кислорода и озон-водородной последовательности для реагентов-предшественников Ir(acac)₃ (*a*) и Ir(MeCp)(CHD) (*b*)

Fig. 6. Comparative data for deposition of the iridium films with the use of oxygen and ozone-hydrogen sequence for the precursors of $Ir(acac)_3(a)$ and Ir(MeCp) (CHD) (b)



Рис. 7. Расчетное заполнение поверхности (a) и значение удельного сопротивления пленки платины (b) при различных температурах для длительности процесса ACO 400 циклов из PtMe₃(MeCp) и различных вторых реагентов (построено с упрощением по данным [32])

Fig. 7. Rated filling of the surface (a) and specific resistance of a platinum film (b) at various temperatures for duration of ALD of 400 cycles from $PtMe_3(MeCp)$ and various second reagents (drawn with simplification by data [32])

ных публикаций пленки иридия выращивали при 275...300 °С. Пленки иридия толщиной 50 нм с удельным сопротивлением около 9 мкОм · см, выращенные при 275 °С, имели шероховатость 1,2 нм, содержали около 3 ат. % кислорода, 0,6 ат. % углерода и 1,65 ат. % водорода. Авторы [30] исследовали АСО Ir и IrO₂ при 120...180 °С по алгоритму работы [28] для Ir(асас)₃. Оказалось (рис. 6, *b*) что в системе Ir(MeCp)(CHD)– O_3 – H_2 можно понизить температуру осаждения на 100 °С в сравнении с АСО Ir(MeCp)(CHD)– O_2 – H_2 с кислородом.

При этом имеет место в 1,5 раза большая скорость осаждения в сравнении с предшественником Ir(acac)₃. При $T_d = 100...120$ °C скорость осаждения составляла около 0,03 нм/цикл в сравнении с 0,02 нм/цикл при 165 °C для Ir(acac)₃. По-видимому, области плато, указанные стрелками на рис. 6, *a*, *b*, свидетельствуют в пользу существования режима АСО иридия.

Тонкие пленки платины получали методом ACO [31, 32] из ацетилацетоната платины $Pt(C_5H_7O_2)_2$, далее $Pt(acac)_2$, с использованием последовательности $Pt(acac)_2-O_3-H_2$. Скорости осаждения при 120...130 °C были примерно постоянными на уровне 0,026 нм/цикл, шероховатость пленок платины толщиной 52...54 нм составляла около 2,0 нм. Удельные сопротивления пленок платины толщиной около 50 нм из $Pt(acac)_2-O_3-H_2$ при 120 и 130 °C составляли 13–14 и 12–13 мкОм · см, соответственно.

Авторы отмечали, что пленки платины, полученные при температуре 300 °С из триметилметилциклопентадиенил платины $Pt(CH_3)_3(CH_3C_5H_5)$, далее $PtMe_3(MeCp)$, при использовании последовательности $PtMe_3(MeCp)$ —воздух O_2 обнаруживали сопротивление 13 мкОм · см при толщине около 110 нм. Моделирование и экспериментальное исследование ACO из предшественника $PtMe_3(MeCp)$ с озоном приведено в публикации [17]. Скорость осаждения была выше, чем с кислородом или воздухом, причем пленки могли быть получены при температуре 150 °С. При осаждении пленок платины с использованием воздуха на предварительно обработанную озоном поверхность образцов было установлено следующее. Обработка в озоне существенно улучшала поверхностное заполнение (авторами использован термин *аpparent coverage*), продляя нуклеацию в область низких температур (рис. 7, *a*).

Улучшение нуклеации и, следовательно, более быстрое начало стационарного роста пленок улучшает электропроводность пленок платины при низкой температуре (рис. 7, *b*).

Обобщение закономерностей формирования и роста МПГ

На рис. 8 показаны два основных пути процесса роста ТП МПГ. Линия 1 представляет тренд обычного традиционного ХОГФ, при котором толщина пленки от времени осаждения (t_d) изменяется линейно, т. е. процесс осаждения стационарен. Этот случай характерен для большинства процессов ХОГФ ТП, для которых свойства поверхности образца не влияют на кинетику ХОГФ. Эти процессы также часто называют газофазными процессами и их описание можно найти, например, в работе [2].

Кривая 2 на рис. 8 отражает более сложный случай осаждения ТП, когда поверхность образца оказывает существенное влияние на формирование тонкой пленки. Эта кривая имеет область нуклеационной задержки (H3), когда пленка формируется с крайне малой скоростью. Далее, после окончания нуклеационного периода, рост пленки становится постоянным во времени в соответствии с кривой 2 на рис. 8. Скорость осаждения в этом случае зависит от количества зародышей материала, созданных в области нуклеации.

Эффект НЗ объясняется свойствами поверхности образца. На рис. 9 показана область селективного роста пленок рутения на локально располо-



Рис. 8. Иллюстрация проблемы нуклеационной задержки при осаждении рутения из газовой фазы: 1 — обычное осаждение с постоянной скоростью наращивания; 2 — осаждение с нуклеационной задержкой. Блочной стрелкой показано предполагаемое влияние озона на процессы АСО

Fig. 8. Illustration of a nucleation delay during deposition of ruthenium from a gas phase: 1 - regular deposition with a constant growth rate; 2 - deposition with a nucleation delay. The block arrow shows the prospective influence of the ozone on the ALD processes



Рис. 9. Область селективного роста пленок рутения на затравочном слое Pt-Pd при импульсном $XOF\Phi$ (заштрихована) Fig. 9. Area of the selective growth of the ruthenium films on the seed layer of Pt-Pd at the pulsed CVD (cross-hatched)

женном на диоксиде кремния затравочном слое Pt-Pd при импульсном ХОГФ (заштрихована) [9]. Можно видеть, что одновременно на затравочном слое можно выращивать пленку рутения, в том числе — на трехмерном рельефе (см. рис. 3, d) при очень низких температурах, в то время как на поверхности диоксида кремния роста ТП не наблюдается.

Длительность H3 зависит также от параметров процесса осаждения, а именно, от температуры, давления, и может быть уменьшена, например, повышением температуры процесса. Однако это приведет к ухудшению конформности роста ТП.

Нуклеация определяет итоговые свойства ТП МПГ: морфологию, плотность, проводимость. Согласно мнению большинства авторов, нуклеация для ХОГФ и АСО МПГ представляет собой серьезную проблему [26]. Причиной затруднений нуклеации МПГ считается возможность частичного термораспада реагентов-предшественников с формированием первых зародышей металлов. Далее эти зародыши катализируют продолжение роста пленки преимущественно на них.

Подробно такой механизм обсуждался в работе [25] для ТП рутения из Ru(CO)₃(C₆H₈) и различных вторых реагентов (NH₃, H₂, N₂O). Было установлено, что пленки рутения (хотя и наихудшего качества) могут быть получены и при термораспаде, т. е. без вторых реагентов. Это подтверждает возможность формирования первых зародышей на поверхности при частичном термораспаде предшественника в ходе самого первого импульса. Отметим, что такой механизм объясняет низкие скорости наращивания ТП МПГ. Однако это означает несоответствие реального механизма их роста традиционной модели АСО. Последняя предполагает взаимодействие адсорбированного реагента-предшественника со вторым реагентом в одну стадию с образованием монослойного покрытия.

Заключение

Использование озона в качестве второго реагента или предварительная обработка поверхности образца в озоне позволяют значительно улучшить процессы нуклеации ТП МПГ. Сокращение длительности нуклеационной задержки дает возможность процессу АСО переходить в стационарную область существенно ранее. При этом улучшается воспроизводимость процессов АСО при низкой температуре, а ТП имеют существенно более низкие электрические сопротивления пленок при меньшей толщине.

Однако причины очень низких по абсолютной величине скоростей пока остаются неясными. Требуется дальнейшее исследование механизма влияния озона, в том числе — исследование влияния типа, структуры и состава реагентов-предшественников на нуклеацию пленок на первых этапах их формирования. Экспериментально важным представляется поиск технических решений по способам генерации озона в потоке кислорода максимально близко или непосредственно на поверхности образцов в камере ACO.

Список литературы

1. **Powell C. F., Oxley J. H., Blocher J. M. Jr.** (Eds.). Vapor Deposition. New York: Wiley, 1966. 725 p.

2. Васильев В. Ю., Репинский С. М. Осаждение диэлектрических слоев из газовой фазы // Успехи химии. 2005. Т. 74, № 5. С. 452—483.

3. **Vasilyev V. Yu.** Thin Film Chemical Vapor Deposition in Integrated Circuit Technology: Equipment, Methodology and Thin Film Growth Research Experience. New York: Nova Science Publishers, Inc., 2014. 314 p.

4. Разуваев Г. А., Грибов Б. Г., Домрачев Г. А., Соломатин Б. А. Металлоорганические соединения в электронике. М.: Наука, 1972. 479 с.

5. **Ritala M., Leskelä M.** Handbook of Thin Film Materials. Vol. 1. Ed. H. S. Nalwa. San Diego: Academic Press, 2001. P. 103–159.

6. Васильев В. Ю., Морозова Н. Б., Игуменов И. К. Химическое осаждение рутенийсодержащих тонких пленок из газовой фазы // Успехи химии. 2014. Т. 83, № 8. С. 758—782.

7. Vasilyev V. Yu., Morozova N. B., Basova N. D., Igumenov I. K., Hassan A. Chemical Vapour Deposition of Ir-based coatings: chemistry, processes and applications // RCS Advances. 2015. Vol. 5. P. 32034—32063.

8. **Hiratani M., Nabatame N., Matsui Y., Kimura S.** Conformal Platinum Thin Films Prepared by Chemical Vapor Deposition under High Oxygen Partial Pressure // Electrochem. Solid State Lett. 2002. Vol. 5, N. 2. P. C28–C30.

9. Rolison D. R., Kuo K., Umana M., Brundage D., Murray R. W. Properties of RuOx Working Electrodes in Nonaqueous Solvents // J. Electrochem. Soc. 1979. Vol. 126, N 3. P. 407–414.

10. Vadimsky R. G., Frankenthal R. P., Thompson D. E. Ru and RuO as Electrical Contact Materials: Preparation and Environmental Interactions // J. Electrochem. Soc. 1979. Vol. 126. N 11. P. 2017–2023.

11. Green M. L., Gross M. E., Papa L. E., Schnoes K. J., Brasen D. Chemical Vapor Deposition of Ruthenium and Ruthenium Dioxide Films // J. Electrochem. Soc. 1979. Vol. 126. N 11. P. 2677–2685.

12. Nayak M., Ezhilvalavan S., Tseng T. Y. / Handbook of Thin Film Material // Vol. 3. Ed. Nalwa H. S. San Diego: Academic Press, 2001. P. 99–167.

13. **Mistra V., Zhong H., Lazar H.** Electrical Properties of Ru-Based Alloy Gate Electrodes for Dual Metal Gate Si-CMOS // IEEE Electron Device Lett. 2002. Vol. 23, N 6. P. 354–356.

14. **Goswami I., Laxman R.** Transition Metals Show Promise as Copper Barriers // Semiconductor International. 2004. Vol. 27, N 5. P. 49–55.

15. Kwon O.-H., Kim J.-H., Park H.-S., Kang S.-W. Atomic Layer Deposition of Ruthenium Thin Films for Copper Glue Layer // J. Electrochem. Soc. 2004. Vol. 151, N 2, P. G109–G112.

16. Kim W.-H., Park S.-J., Son J.-Y., Kim H. Ru nanostructure fabrication using an anodic aluminum oxide nanotemplate and highly conformal Ru atomic layer deposition // Nanotechnology. 2008. Vol. 19. N 4. P. 45302–45309.

17. Chen W., Zhang M., Zhang D. W., Ding S.-J., Tan J.-J., Xu M., Qu X.-P., Wang L.-K. Growth of high-density Ru- and RuO₂-composite nanodots on atomic-layer-deposited Al₂O₃ film // Applied Surface Science. 2007. Vol. 253. N 8. P. 4045–4050.

18. **Kim S., Karabacak T., Lu T.-M., Koratkar N.** Hydrogen generation using ruthenium nano-rod array electrodes // Proc. SPIE conference. 2006. Vol. 61720B. P. 85–93.

19. Biener J., Baumann T. F., Wang Y., Nelson E. J., Kucheyev S. O., Hamza A. V., Kemell M., Ritala M., Leskelä M. Ruthenium/aerogel nanocomposites via atomic layer deposition // Nanotechnology, 2007. Vol. 18, N 5. Paper № 055303 (4 p.).

20. **BlackstockJ. J., Stewart D. R., Li Ž.** Plasma-produced ultra-thinplatinum-oxide films for nanoelectronics:physical characterization // Appl. Phys. A. 2005. Vol. 80. P. 1343–1353.

21. Jung W. C., Kim J. J., Tuller H. L. Investigation of nanoporous platinum thin films fabricated by reactivesputtering: Application as micro-SOFC electrode // J. Power Sources. 2015. Vol. 275. P. 860–865.

22. **El Sawy E. N., Birss V. I.** Nano-porous iridium and iridium oxide thin films formed by high efficiency electrodeposition // J. Mater. Chem. 2009. Vol. 19. P. 8244–8252.

23. **Tabet-Aoul A., Mohamedi V.** Rhodium thin film-carbon nanotube nanostructures: Synthesis, characterization and electron transfer properties // Thin Solid films. 2013. Vol. 534. P. 270–274.

24. Vasilyev V. Yu., Mogilnikov K. P., Song Y. W. Nucleation and growth of pulsed CVD Ruthenium films from tricarbonyl[η^4 -cyclohexa-1,3-diene]ruthenium // J. Electrochem. Soc. 2008. Vol. 115, N 12. P. D763–D770.

25. **Vasilyev V. Yu.** Low-temperature thermally-activated pulsed chemical vapor deposition of ruthenium thin films using carbonyl-diene precursor // Ruthenium: Properties, Production and Applications / Ed. David B. Watson. New York: Nova Science Publishers Inc. 2011. P. 2–85.

26. Hamalainen J., Ritala M., Leskelä M. Atomic layer deposition of noble metals and their oxides // Chemistry of Materials. 2014. Vol. 26. P. 786–801.

27. Igumenov I. K., Semyannikov P. P., Trubin S. V., Morozova N. B., Gelfond N. V., Mischenko A. V., Norman J. Approach to control deposition of ultra thin films from metal organic precursors: Ru deposition // Surf. & Coat. Technol. 2007. Vol. 201. P. 9003–9008.

28. Hamalainen J., Puukilainen E., Kemell M., Costelle L., Ritala M., Leskela M. Atomic Layer Deposition of Iridium Thin Films by Consecutive Oxidation and Reduction Steps // Chem. Mater., 2009. Vol. 21. P. 4868–4872.

29. Hamalainen J., Hatanpaa T., Puukilainen E., Costelle L., Pilvi T., Ritala M., Leskela M. (MeCp)Ir(CHD) and molecular oxygen as precursors in atomic layer deposition of iridium // J. Mater. Chem., 2010. Vol. 20. P. 7669—7675. 30. Hamalainen J., Hatanpaa T., Puukilainen E., Sajavaara T.,

30. Hamalainen J., Hatanpaa T., Puukilainen E., Sajavaara T., Ritala M., Leskela M. Iridium metal and iridium oxide thin films grown by atomic layer deposition at low temperatures // J. Mater.Chem. 2011. Vol. 21. P. 16488–16493.

31. Hamalainen J., Puukilainen E., Sajavaara T., Ritala M., Leskela M. Low temperature atomic layer deposition of noble metals using ozone and molecular hydrogen as reactants // Thin Solid Films. 2013. Vol. 531. P. 243–250.

32. Lee H. B. R., Pickrahn K. L., Bent S. F. Effect of O_3 on Growth of Pt by Atomic Layer Deposition // J. Phys. Chem. C. 2014. Vol. 118. P. 12325–12332.

V. Yu. Vasiliev, D. Sc., Professor, Novosibirsk State Technical University (NSTU), Deputy Director General of SibIS Co., Novosibirsk, Russia, vasiliev@sib-is.ru

Ultra-Thin Metal Films of the Platinum Group for Application in Nano- and Micro-Technologies

The author analyzes a number of questions concerning obtaining of the ultra-thin conducting films from the platinum group of metals (Ru, Rh, Pd, Os, Ir, Pt) by the method of chemical deposition, and their application in nano- and micro system technologies. He shows that the key factor of a continuous growth of a film with good conductivity is the film nucleation at the first stages of the film formation. The author analyzes the specific features of application of ozone as the second reagent of the deposition processes, and the directions for the further research, including the necessity to study the surface processes at the first stages of the atomic layer deposition of the metal films.

Keywords: thin films, atomic layer deposition, platinum group metals, precursors, nucleation delay, ozone

Introduction and problem statement

Thin film materials are the basis of the electronic components made by means of nano- and microtechnologies. The thin films (TF) are mainly obtained by the method of the Chemical Vapor Deposition (CVD) [1-3]. During CVD on the surface of a sample heated up to the required temperature the growth of a thin film occurs due to the irreversible chemical reactions of the initial reagents, so that CVD provides an opportunity for an accurate control of the parameters, thickness, structure and properties of the films. For CVD of metal films the term "thermal-decomposition of the metal-organic compounds" is also used [4] (Metal-Organic CVD, MOCVD).

An essential advantage of CVD in comparison with the other methods of TF manufacture is a possibility of reception of the conformal films on complex three-dimensional structures of various forms. In a simplified way the three-dimensional structures can be described by the relief elements of a rectangular form and their "aspect ratio" (AR), the ratio of the height to the width of an element. Under conformality we understand the equivalence of the thickness of a thin film on all the surface of a complex relief. Reception of the conformal coatings is a challenge task, which for many years has been solved, for example, in microelectronics due to complication of the integrated microcircuits [2, 3]. On such complex reliefs the other methods of creation of coatings, for example, sputtering, are unacceptable. For achievement of a conformal deposition of films on the structures with high AR the impulse, or pulsed, CVD are applied. In these pulsed methods the initial chemical reagents are introduced into the reaction chambers by short consecutive impulses. At that, the impulses of the reagents are divided by the impulses of the inert gas clearing the chamber from the remains of the previous reagent. The pulsed processes are cyclic. Their duration is measured by the number of cycles of deposition, and the speed of growing of a thin film is counted per one cycle of deposition. The main film-forming reagent of CVD is called the precursor. For some precursors and realization of CVD the mode of the surface reaction is realized in a narrow low-temperature range. It is often called a monolayer deposition or Atomic Layer Deposition, ALD) [5]. The chronology and results of R&D of CVD for various thin film coatings with reference to the microelectronic technologies are considered in [2, 3].

The thin films of the metals of the platinum group (MPG - Ru, Rh, Pd, Os, Ir, Pt) cause interest from the point of view of their application in the precision technologies. These metals have high melting temperatures, good electrical conduc-

tivity, high resistance to chemical reagents and oxidizing processes. Among MPG of special interest are the thin films of ruthenium [6], iridium [7] and platinum [8] received by CVD. Besides, ruthenium and iridium have good conducting oxides (RuO₂, IrO₂), which makes them attractive for the microelectronic technologies involving numerous oxidizing processes in manufacture of the devices.

For example, ruthenium-containing TF were considered as a possible material for the electrochemical electrodes [9], contacts [10] and metallization in the multilevel integrated microcircuits [11]. At the beginning of the 21st century in the microelectronic technology with the standards less than 100 nm the ruthenium was investigated for application as electrodes in the condenser memory cells of Metal-Insulator-Metal type (MIM) [12]. Ruthenium also was considered as a material for the transistors' gates [13], as the barrier layers [14], and also as the conducting nucleation layers for the so-called "copper" multilayered metallization of the integrated microcircuits by electrodeposition [15]. Besides the aims specified above, the ruthenium and the other metals of the group were considered for various nano-technological applications, some examples see in [16–23]. By the sum of the literary data TF MPG are considered in the precision devices mainly as conducting materials, for example, for the electrodes of various devices. At that, of big interest is a possibility of their use at higher temperatures.

The main property of the metal coatings is their electrical conductivity. The trend for scaling of the elements of the nano- and microelectronic precision devices is known. With reference to TF conductors it means a decrease of their thickness down to nano-sizes with preservation of the requirements to high electrical conductivity, including in complex three-dimensional structures of the devices.

The problem with deposition of MPG is that the superthin films of metals reveal discontinuity flaws and high resistance. The example in fig. 1 illustrates the problem of electrical conductivity for the pulsed CVD thin films of ruthenium [24]. Thus the continuous layers at 290 °C were formed at the number of pulses more than 30.

No generalizations of the research works on electrical conductivity of the superthin MPG have been published. This work systematized the information on the influence of the conditions of deposition on the structure and electric resistance of MPG thin films. Such information allows us to determine directions of the research works in the field of the synthesis of the superthin continuous metal conductive layers for nano- and microtechnologies.

General characteristic of the thin film deposition

The complexities of realization of CVD for TF MPG can be grouped in the following way.

Variety of precursors. The initial reagents belong to various classes of the chemical substances and contain different functional groups, including carbon, hydrogen, oxygen and other elements. For example, in [24, 25] the authors describe obtaining of TF of ruthenium from carbonyl Ru₃(CO)₁₂, acetylacetonate of ruthenium Ru(C₅H₇O₂)₃, ruthenocene Ru(C₅H₅)₂ and their derivatives, and also from the nitrogenand phosphoprous-containing reagents. For iridium besides the above-mentioned classes of the initial reagents, the halogen-containing reagents of IrCl₃, IrCl₄, IrBr₃, IrF₆ were also used. A similar situation is with the other MPG.

Variety of the second reagents. The thermal decomposition processes are often carried out in vacuum, in an inert or reducing environment. This allows us to prevent oxidation of the deposited metal. However, in this case there is a problem with an incomplete thermal decomposition of the organic groups and incorporation in TF of a carbon impurity with concentration up to tens of the atomic percent of nitrogen and hydrogen. Carbon essentially worsens the structure, physical-chemical and electric properties of the thin films of metals. Application of the oxidizing environments (molecular oxygen, nitrogen-oxygen mixes, carbon and nitrogen oxides, water vapors, etc.) provides opportunity to improve the completeness of oxidation of the precursors. Volatile by-products of the reactions are formed and in TF the concentrations of the undesirable elements (C, H, N) decrease. In view of the risk of formation of the undesirable oxide phases of the deposited metal an optimization of the ratio of an oxidizer to the initial precursor is required.

For CVD MPG the combinations of the second reagents were investigated, allowing during the synthesis of TF, to clean it from the undesirable impurity elements. For example, in [25] besides the single second reagents for reception of TF of ruthenium from Ru(CO)₃(C₆H₈) during a pulsed CVD, the sequences of impulses of an oxidizer (N₂O) and a reducer (NH₃) were used. In [26] as a perspective way of reception of TF by ALD method it was proposed to use the ozone and the so-called "double second reagent", namely — sequence of O_3-H_2 . Such a method allows us to delete the undesirable elements from TF, to improve the structure of the films and to reduce their electric resistance.

Multi-factor conditions of the deposition. The CVD processes go under various conditions (temperature and pressure usually vary, as well as the speeds of supplying of the reagents to a reactor and concentration of the reagents, etc.). The decisive factor is CVD temperature of T_d . For example, in [25] it is demonstrated, that at an impulse CVD of ruthenium from Ru(CO)₃(C₆H₈) the "critical" temperature of deposition is $T_d = 200$ °C, fig. 2, *a*, *b*, *c*.

At $T_d \le 200$ °C the film growth was slowed down due to the long nucleation delays (nucleation is the surface concentrations and sizes of the TF grains). The films grew as coarsegrained, fig. 3, *a*, friable, with low density. Improvement of the film structure took place with increase of the pressure of the reagents at CVD. This made it possible to raise the filling of the surface with the molecules of the initial precursor. At that, big grains in the ruthenium films consisted from nanocrystalline particles with the estimated sizes of about 5 nm [9], fig. 3, *a*. Such sizes appeared to be close to the sizes of the nano-crystalline particles of 3–4 nm, found in the work [27] for the films of ruthenium received from another reagent – acetylacetonate of ruthenium $Ru(C_5H_7O_2)_3$.

At $T_d > 200$ °C the laws of the ruthenium growth followed the schemes of the processes of TF growth [2]. The properties and electrical resistance of TF of ruthenium were acceptable, however, the conformity of the coatings on the step reliefs was unsatisfactory.

Influence of the complexity of a sample's relief. General questions concerning TF growth on complex reliefs of the three-dimensional semi-conductor structures are considered in [2]. For the metal films it is necessary to take into consideration a possibility of distinction of a structure on the relief of a sample, fig. 2, c. In case of a slowed down nucleation separate grains can grow in a relief. As a result, metal coatings will have ruptures on the relief, causing a loss of electrical conductivity of TF. For improvement of the conformity it is necessary to reduce the temperature of deposition in order to avoid the undesirable chemical reactions in the gas phase [2]. However, decrease of T_d influences the growth characteristics of the CVD processes and TF properties, fig. 2, a, b, c.

Influence of the properties of the sample's surface on the initial stages of formation of a metal thin film. The state of a surface of a sample makes a key impact on the growth characteristics of MPG. In [25] it was demonstrated, that in the "plateau" area in fig. 2, *a* the character of nucleation of ruthenium was very different for different surfaces. Thus, the worst nucleation was observed for nitride of silicon Si₃N₄ on silicon, and the best — for the samples with the oxides of aluminum Al₂O₃ and hafnium HfO₂, received by ALD method on silicon. For the monocrystalline silicon Si and silicon dioxide SiO₂ the nucleation was practically the same, which is explained by the presence of a natural oxide on the silicon surface.

However, on the surface of the sub-nanometer (~0,8 nm) deposited seed layers (SL) of MPG (the most convenient alloy was 70 % Pt – 30 % Pd) the ruthenium films were formed essentially differently, fig. 3, *b*. Even at the thickness < of 10 nm, including on 3D structures at the lowered temperature of deposition, the ruthenium films were continuous. They consisted from the nano-crystalline particles with the sizes of about 5 nm and had the surface roughness of < 1 nm). Application of SL allowed to lower the temperature of deposition (W_d), fig. 4, *a*.

At that, the low-temperature TF of ruthenium on the seed layers revealed essentially lower electrical resistance (fig. 4, *b*). However, improvement of the nucleation at the first stage of the film formation did not lead to a decrease of the resistance down to the values, characteristic for the metal ruthenium (about $7 \ \mu\Omega \cdot cm$). This is explained by the influence on the nucleation of the other factors, first of all — carbon and oxygen impurities in TF. The nucleation and growth features of formation of TF MPG are generalized in the following section.

Growth of thin films of MPG. A brief review

The nucleation and electric conductivity of TF MPG are influenced by all the factors listed in the previous section. The questions and methods of improvement of MPG nucleation were considered by many specialists [6, 7, 24, 25]. However, the solutions offered by them appeared ineffective, in particular, for work with the high-aspect structures.

The only experimentally proved and encouraging version of improvement of nucleation at ALD MPG is the use of the ozone. It is applied for carrying out of the preliminary processing of the samples' surface before the deposition or as the second reagent. In [26] there is a general scheme for obtaining of TF MPG (fig. 5). The scheme is acceptable for most of the used precursors.

At $T_d > 200$ °C it is possible to receive quality TF MPG with the use of oxygen as the second reagent. Application of ozone allows us to improve the nucleation at the first stages of formation and growth of TF at $T_d < 200$ °C. Obviously, the ozone improves the thermal decomposition of the precursors and allows to form MPG nuclei free from the carbon impurities. The hydrogen impulse following the impulse of the ozone (actually this means application of "a double second reagent") allows us to remove the oxide phase from a just deposited metal TF. Thus, the hydrogen plays the role of a reducer of the surface of MPG nuclei partially oxidized by the ozone.

Let us consider briefly the basic actual experimental results for the films of iridium and platinum with application of the ozone.

Thin films of iridium were received from two precursors by means of ALD.

In [28] the films of iridium were grown by ALD method from acetylacetonate of iridium $Ir(C_5H_7O_2)_3$, (hereinafter Ir(acac)₃), ozone and molecular hydrogen at 165...200 °C. ALD was done with the use of a consecutive impulse supply of gases O_3 — H_2 : Ir(acac)₃-blow- O_3 -blow- H_2 -blow. The speed of deposition was 0,02 nm/cycle with a small nucleation delay (fig. 6, a). An analysis demonstrated, that after 100 cycles of deposition (which corresponds to the effective thickness of coating of about 2 nm), the films were not continuous. After 200 cycles (thickness of 5 nm) there still were cavities in films, after 300 cycles (thickness of 7 nm) the films looked continuous, but their conductivity was unreliable. The films of 60 nm thickness had a low specific resistance, less than $12 \ \mu\Omega \cdot cm$ and roughness of 1,4 nm. The impurities in the film were hydrogen with concentration of 2 at. %, carbon -1 at. % and oxygen -4...7 at. %. On the step structures with the height of 1200 nm and a gap of 150 nm (AR = 8) the conformal iridium films were received at 165 °C.

Subsequently in [29, 30] the growth of iridium and iridium oxide films was investigated at ALD and low temperatures with the use of precursor of methylcyclopentadienilcyclohexadien of iridium Ir(CH₃C₅H₅)(C₈H₁₂), hereinafter, Ir(MeCp)(CHD). In the first publication the iridium films were grown at 275...300 °C. Films of iridium with thickness of 50 nm and specific resistance of about 9 $\mu\Omega \cdot cm$, grown at 275 °C, had roughness of 1,2 nm, contained about 3 at. % of oxygen, 0,6 at. % of carbon and 1,65 at. % of hydrogen. In [30] ALD Ir and IrO₂ were investigated at 120...180 °C by algorithm [28] for Ir(acac)₃. It turned out, fig. 6, *b*, that in Ir(MeCp)(CHD)–O₃–H₂ system it was possible to lower the deposition temperature by 100 °C in comparison with ALD Ir(MeCp)(CHD)–O₂–H₂ with oxygen.

At that, the deposition rate in comparison with predecessor $Ir(acac)_3$ was 50 % higher. At $T_d = 100...120$ °C the rate of deposition was about 0,03 nm/cycle in comparison with 0,02 nm/cycle at 165 °C for Ir(acac)_3. Obviously, the areas of the plateau, pointed to by arrows in fig. 6, *a*, *b*, testify to the existence of ALD of iridium mode.

Thin films of platinum received by ALD [31, 32] from acetylacetonate of platinum $Pt(C_5H_7O_2)_2$, hereinafter, $Pt(acac)_2$, with the use of sequence $Pt(acac)_2-O_3-H_2$. The deposition rates at 120...130 °C were approximately constant, at the level of 0,026 nm/cycle, the roughness of the platinum films with thickness of 52...54 nm was about 2,0 nm. The specific resistance of the platinum films with thickness of about

50 nm from Pt(acac)₂ $-O_3-H_2$ at 120 and 130 °C were, correspondingly, 13–14 and 12–13 $\mu\Omega \cdot cm$.

The authors pointed out, that the platinum films received at temperature of 300 °C from trimethylmethylcyclopentanedienil of platinum Pt(CH₃)₃(CH₃C₅H₅), hereinafter, PtMe₃(MeCp), when the sequence PtMe₃(MeCp)-O₂ was used, revealed resistance of 13 $\mu\Omega$ · cm at the thickness of about 110 nm. Modeling and experimental research of ALD from predecessor of PtMe₃(MeCp) with ozone is presented in the publication [17]. The rate of deposition was higher, than with oxygen or air, at that, the films could be received at 150 °C. During deposition of the platinum films with the use of air on the surface of the samples preliminary processed with ozone, the following facts were established. Processing in the ozone essentially improved the apparent coverage, prolonging the nucleation to the area of low temperatures, fig. 7, *a*.

Improvement of the nucleation and quicker start of the stationary growth of films improves the electrical conductivity of the platinum films at low temperatures, fig. 7, *b*.

Generalization of the laws of formation and growth of MPG

Fig. 8 presents two main ways of growth of TF MPG. Line 1 presents the trend of a regular, traditional CVD, at which the thickness of a film changes from the deposition time (t_d) linearly, that means, the deposition is stationary. The case is typical for most of the CVD TF processes, for which the properties of the sample's surface do not influence the kinetics of CVD. These processes are often called "gas-phase processes" and their description can be found in [2].

Curve 2 in fig. 8 reflects a more complex case of TF deposition, when the surface of a sample has an essential impact on the formation of a thin film. This curve has the area of a nucleation delay (ND), when a film is formed with an exceptionally low speed. Subsequently, after termination of the nucleation period, the film growth becomes constant in time in accordance with curve 2 in fig. 8. In this case the deposition rate depends on the number of nuclei of the material created in the area of nucleation.

ND effect is explained by the surface properties. Fig. 9 presents the area of the selective growth of the ruthenium films on the Pt-Pd seed layer locally situated on the silicon dioxide at a pulsed CVD (cross-hatched) [9]. It is possible to see, that on the seed layer it is possible to grow simultaneously a ruthenium film, including on a 3D relief (fig. 3, d) at very low temperatures, while on the surface of the silicon dioxide a growth of TF is not observed.

Duration of ND depends also on the deposition parameters, namely: temperature, pressure, and it can be reduced, for example, by raising the temperature. However, this will lead to deterioration of the conformity of the TF growth.

Nucleation determines the final properties of TF MPG: morphology, density and conductivity. According to most authors, nucleation presents a serious problem for CVD and ALD MPG [26]. The reason for the problems with nucleation of MPG is explained by a possibility of a partial thermal decomposition of the precursors with formation of the first nuclei of metals. Further, the nuclei catalyze continuation of the film growth mainly on them.

In detail the mechanism was discussed in [25] for TF of ruthenium from $\text{Ru}(\text{CO})_3(\text{C}_6\text{H}_8)$ and various second reagents (NH₃, H₂, N₂O). It was established that the ruthenium films (although of the worse quality) can be received also at a thermal decomposition without the second reagents. This confirms a possibility of formation of the first nuclei on the sur-

face at a partial thermal decomposition of the predecessor during the first impulse. Let us point out, that such a mechanism explains the low speeds of growth of TF MPG. However, it means a discrepancy between the real mechanism of growth and the traditional model of ALD. The latter envisages interaction of the adsorbed precursor with the second reagent in one stage with formation of a monolayer coating.

Conclusion

Use of the ozone as the second reagent or preliminary processing of the sample's surface in the ozone allow us to improve considerably the nucleation processes of TF MPG. Reduction of duration of the nucleation delay provides a chance for the ALD process to pass to the stationary area considerably earlier. At that, the reproducibility of the ALD processes at low temperatures improves, and TF have essentially lower electric resistance at a smaller thickness.

The reasons for very low speeds in absolute values remain unclear. The further research is required of the influence of the ozone, including the influence of the type, structure and composition of the precursors on the nucleation of films at the first stages of their formation. It is experimentally important to continue search for the solutions concerning generation of the ozone in an oxygen flow directly on the surface of the samples in ALD chamber, or as close to it, as possible.

References

1. Powell C. F., Oxley J. H., Blocher J. M., Jr. (Eds.), Vapor Deposition, New York, Wiley, 1966, 725 p.

2. Vasilev V. Yu., Repinsky S. M., Chemical vapour deposition of thin-film dielectrics, Russ. Chem. Rev., (Engl. Transl.), 2005, vol. 74, pp. 413-441.

3. Vasilyev V. Yu., Thin Film Chemical Vapor Deposition in Integrated Circuit Technology: Equipment, Methodology and Thin Film Growth Research Experience, New York, Nova Science Publishers, Inc., 2014, 314 p.

4. Razuvaev G. A., Gribov B. G., Domrachev G. A., Salamatin B. A., Metalloorganicheskie soedineniya v elektronike, Moscow, Nauka, 1972, 479 p.

5. Ritala M., Leskelä M., in Handbook of Thin Film Materials. Vol. 1. Nalwa H. S. Ed. Academic Press. San Diego. 2001. P. 103–159.
6. Vasilyev V. Yu., Morozova N. B., Igumenov I. K., Chemical

vapour-phase deposition of ruthenium thin films, Russ. Chem. Rev.,

(Engl. Transl.), 2005, vol. 74, pp. 758–782. 7. Vasilyev V. Yu., Morozova N. B., Basova N. D., Igumenov I. K., Hassan A., Chemical Vapour Deposition of Ir-based coatings: chemistry, processes and applications, *RCS Advances*, 2015, vol. 5, pp. 32034–32063.

8. Hiratani M., Nabatame N., Matsui Y., Kimura S., Conformal Platinum Thin Films Prepared by Chemical Vapor Deposition under High Oxygen Partial Pressure, Electrochem. Solid State Lett.,

2002, vol. 5, no. 2, pp. C28–C30.
9. Rolison D. R., Kuo K., Umana M., Brundage D., Murray R. W., Properties of RuO_x Working Electrodes in Nonaqueous

Solvents, J. Electrochem. Soc., 1979, vol. 126, no. 3, pp. 407–414. 10. Vadimsky R. G., Frankenthal R. P., Thompson D. E., Ru and RuO as Electrical Contact Materials: Preparation and Environmental Interactions, J. Electrochem. Soc., 1979, vol. 126, no. 11, pp. 2017-2023

11. Green M. L., Gross M. E., Papa L. E., Schnoes K. J., Brasen D., Chemical Vapor Deposition of Ruthenium and Ruthenium Dioxide Films, J. Electrochem. Soc., 1979, vol. 126, no. 11, pp. 2677-2685

12. Nayak M., Ezhilvalavan S., Tseng T. Y., in Handbook of Thin Film Material, vol. 3, ed. H. S. Nalwa, San Diego, Academic Press, 2001, pp. 99-167.

13. Mistra V., Zhong H., Lazar H., Electrical Properties of Ru-Based Alloy Gate Electrodes for Dual Metal Gate Si-CMOS, IEEE Electron Device Lett., 2002, vol. 23, no. 6, pp. 354-356.

14. Goswami I., Laxman R., Transition Metals Show Promise as Copper Barriers, Semiconductor International, 2004, vol. 27, no. 5, pp. 49-55.

15. Kwon O.-H., Kim J.-H., Park H.-S., Kang S.-W., Atomic Layer Deposition of Ruthenium Thin Films for Copper Glue Layer, J. Electrochem. Soc., 2004, vol. 151, no. 2, pp. G109-G112.

16. Kim W.-H., Park S.-J., Son J.-Y. and Kim H., Ru nanostructure fabrication using an anodic aluminum oxide nanotemplate and highly conformal Ru atomic layer deposition, Nanotechnology, 2008, vol. 19, no. 4, pp. 45302-45309.

17. Chen W., Zhang M., Zhang D. W., Ding S.-J., Tan J.-J., Xu M., Qu X.-P., Wang L.-K., Growth of high-density Ru- and RuO₂-composite nanodots on atomic-layer-deposited Al₂O₃ film, Applied Surface Science, 2007, vol. 253, no. 8, pp. 4045–4050.

18. Kim S., Karabacak T., Lu T.-M., Koratkar N., Hydrogen generation using ruthenium nano-rod array electrodes, Proc. SPIE conference, 2006, vol. 61720B, pp. 85-93.

19. Biener J., Baumann T. F., Wang Y., Nelson E. J., Kuche-yev S. O., Hamza A. V., Kemell M., Ritala M., Leskelg M., Ruthenium/aerogel nanocomposites via atomic layer deposition, Nanotechnology, 2007, vol. 18, no. 5, Paper № 055303 (4 pages).

20. BlackstockJ. J., Stewart D. R., Li Z., Plasma-produced ultra-thinplatinum-oxide films for nanoelectronics:physical characterization, Appl. Phys. A., 2005, vol. 80, pp. 1343-1353.

21. Jung W. C., Kim J. J., Tuller H. L., Investigation of nanoporous platinum thin films fabricated by reactivesputtering: Application as micro-SOFC electrode, J. Power Sources, 2015, vol. 275, pp. 860-865.

22. El Sawy E. N., Birss V. I., Nano-porous iridium and iridium oxide thin films formed by high efficiency electrodeposition, J. Mater. Chem., 2009, vol. 19, pp. 8244-8252.

23. Tabet-Aoul A., Mohamedi V., Rhodium thin film-carbon nanotube nanostructures: Synthesis, characterization and electron transfer properties, *Thin Solid films*, 2013, vol. 534, pp. 270–274. 24. **Vasilyev V. Yu., Mogilnikov K. P., Song Y. W.**, Nucleation and growth of pulsed CVD Ruthenium films from tricarbonyl[η^4 -cy-

clohexa-1,3-diene]ruthenium // J. Electrochem. Soc. 2008. Vol. 115. N 12. P. D763-D770.

25. Vasilyev V. Yu., Low-Temperature Thermally-Activated Pulsed Chemical Vapor Deposition of Ruthenium Thin Films Using Carbonyl-Diene Precursor, Ruthenium: Properties, Production and Applications, ed. David B. Watson, New York, Nova Science Publishers Inc. 2011, pp. 2-85

26. Hamalainen J., Ritala M., Leskelä M., Atomic Layer Deposition of Noble Metals and Their Oxides, Chemistry of Materials, 2014, vol. 26, pp. 786-801.

27. Igumenov I. K., Semyannikov P. P., Trubin S. V., Morozo-va N. B., Gelfond N. V., Mischenko A. V., Norman J., Approach to control deposition of ultra thin films from metal organic precursors: Ru deposition, Surf. & Coat. Technol., 2007, vol. 201, pp. 9003-9008

28. Hamalainen J., Puukilainen E., Kemell M., Costelle L., Ritala M., Leskela M., Atomic Layer Deposition of Iridium Thin Films by Consecutive Oxidation and Reduction Steps, Chem. Mater., 2009, vol. 21, pp. 4868-4872.

29. Hamalainen J., Hatanpaa T., Puukilainen E., Costelle L., Pilvi T., Ritala M., Leskela M., (MeCp)Ir(CHD) and molecular oxygen as precursors in atomic layer deposition of iridium, J. Mater. Chem., 2010, vol. 20, pp. 7669-7675

30. Hamalainen J., Hatanpaa T., Puukilainen E., Sajavaara T., Ritala M., Leskela M., Iridium metal and iridium oxide thin films grown by atomic layer deposition at low temperatures, *J. Mater.* Chem., 2011, vol. 21, pp. 16488-16493.

31. Hamalainen J., Puukilainen E., Sajavaara T., Ritala M., Leskela M., Low temperature atomic layer deposition of noble metals using ozone and molecular hydrogen as reactants, Thin Solid Films, 2013, vol. 531, pp. 243-250.

32. Lee H. B. R., Pickrahn K. L., Bent S. F., Effect of O₃ on Growth of Pt by Atomic Layer Deposition, J. Phys. Chem. C., 2014, vol. 118, pp. 12325–12332.

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.

Технический редактор Т. А. Шацкая. Корректор Т. В. Пчелкина.

Сдано в набор 21.05.2016. Подписано в печать 20.06.2016. Формат 60×88 1/8. Заказ MC0716. Цена договорная

Оригинал-макет ООО «Адвансед солюшнз». Отпечатано в ООО «Адвансед солюшнз». 119071, г. Москва, Ленинский пр-т, д. 19, стр. 1. Сайт: www.aov.ru