TAIO- & MIKPOCICIEMHAA

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 международную базу данных Scopus

Главный редактор

Мальцев П. П., д.т.н, проф.

Зам. гл. редактора

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

Редакционный совет:

Аристов В. В., д.ф.-м.н., проф., чл.-кор. РАН Асеев А. Л., д.ф.-м.н., проф., акад. РАН Гапонов С. В., д.ф.-м.н., проф., акад. РАН Каляев И. А., д.т.н., проф., чл.-кор. РАН Квардаков В. В., д.ф.-м.н., проф., чл.-кор. РАН Климов Д. М., д.т.н., проф., чл.-кор. РАН Ковальчук М. В., д.ф.-м.н., проф., чл.-кор. РАН Нарайкин О. С., д.т.н., проф., чл.-кор. РАН Рыжий В. И., д.ф.-м.н., проф., чл.-кор. РАН Сяров А. И., д.ф.-м.н., проф., чл.-кор. РАН 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) Андреев А., к.ф.-м.н., (Великобритания) Андриевский Р. А., д.х.н., проф. Антонов Б. И. Астахов М. В., д.х.н., проф. Быков В. А., д.т.н., проф. Волчихин В. И., д.т.н., проф. Горнев Е. С., д.т.н., проф. Градецкий В. Г., д.т.н., проф. Кальнов В. А., к.т.н. Карякин А. А., д.х.н., проф. Колобов Ю. Р., д.т.н., проф. Кузин А. Ю., д.т.н., проф. Мокров Е. А., д.т.н. Панич А. Е., д.т.н., проф. Панфилов Ю. В., д.т.н., проф. Петросянц К. О., д.т.н., проф. Петрунин В. Ф., д.ф.-м.н., проф. Пожела К., д.ф.-м.н. (Литва) Путилов А. В., д.т.н., проф. Пятышев Е. Н., к.ф.-м.н. Стриханов М. Н., д.ф.-м.н., проф. Телец В. А., д.т.н., проф. Тимошенков С. П., д.т.н., проф. Тодуа П. А., д.т.н., проф. Шубарев В. А., д.т.н., проф. Отв. секретарь Лысенко А. В. Релакция: Григорин-Рябова Е. В. Чугунова А. В. Учредитель:

Издательство "Новые технологии"

СОДЕРЖАНИЕ

МОДЕЛИРОВАНИЕ И КОНСТРУИРОВАНИЕ МНСТ

Гридчин В. А., Васильев В. Ю., Чебанов М. А., Бялик А. Д., Чернов А. С. Численное моделирование элементов фотоэлектрического волоконно-оптического сенсора давления.

Сивченко А. С., Кузнецов Е. В. Методики анализа основных характеристик надежности в КМОП ИС с помощью тестовых структур в составе пластин

МАТЕРИАЛОВЕДЧЕСКИЕ И ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ МНСТ

Галперин В. А., Громов Д. Г., Лебедев Е. А., Шулятьев А. С., Смирнов Д. И., Шиляева Ю. И. Размерный эффект в многослойных тонкопленочных термитных материалах на основе композита алюминий — нитрид меди . 16

Чуйко О. В., Кузнецов Е. В., Савельев М. И., Комарова Н. В., Сироткина М. С. Технология формирования интегральной микрофлюидной КМОП-системы с нанопроволочными чувствительными элементами 23

элементы мнст

3

7

Мальцев П. П., Майтама М. В., Павлов А. Ю., Щаврук Н. В. Расчет и изготовление узкополосного СВЧ микроэлектромеханического переключателя для частотного диапазона 10...12 ГГц на подложках арсенида галлия . . 30

Суханов А. В., Прокофьев И. В., Гусев Д. В. Мультиагентная система мониторинта web-датчиков, созданная на основе наносенсорики . 42

Платонов К. В. Микросборки с встроенными

Гусев Д. В., Данилова Н. Л., Землянников Н. С., Суханов В. С. Многоканальные тензорезистивные преобразователи давления . . . 52

СИСТЕМА НА КРИСТАЛЛЕ

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 2012 г. в разделе "АРХИВ".

ПОДПИСКА:

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

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

Издается с 1999 г.

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

Editorial council:

Aristov V. V., Dr. Sci. (Phys.-Math.), Prof., Cor.-Mem. RAS Aseev A. L., Dr. Sci. (Phys.-Math.), Prof., Acad. RAS Chaplygin Ju. A., Dr. Sci. (Tech.), Prof., Cor.-Mem. RAS Gaponov S. V., Dr. Sci. (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. (Tech.), 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. Andreev A. (UK), Cand. Sci. (Phys.-Math.), Prof. Andrievskii R. A., Dr. Sci. (Chem.), Prof. Antonov B. I. Astahov M. V., Dr. Sci. (Chem.), Prof. Bykov V. A., Dr. Sci. (Tech.), Prof. Gornev E. S., Dr. Sci. (Tech.), Prof. Gradetskiy V. G., Dr. Sci. (Tech.), Prof. Kalnov V. A., Cand. Sci. (Tech.) Karjakin A. A., Dr. Sci. (Chem.), Prof. Kolobov Ju. R., Dr. Sci. (Tech.), Prof. Kuzin A. U., Dr. Sci. (Tech.), Prof. Mokrov E. A., Dr. Sci. (Tech.) Panfilov Ju. V., Dr. Sci. (Tech.), Prof. Panich A. E., Dr. Sci. (Tech.), Prof. Petrosjants C. O., Dr. Sci. (Tech.), Prof. Petrunin V. F., Dr. Sci. (Phys.-Math.), Prof. Piatishev E. N., Cand. Sci. (Phys.-Math.), Prof. Pozhela K.(Lithuania), Dr. Sci. (Phys.-Math.) Putilov A. V., Dr. Sci. (Tech.), Prof. Strikhanov M. N., Dr. Sci. (Phys.-Math.), Prof. Shubarev V. A., Dr. Sci. (Tech.), Prof. Telets V. A., Dr. Sci. (Tech.), Prof. Timoshenkov S. P., Dr. Sci. (Tech.), Prof. Todua P. A., Dr. Sci. (Tech.), Prof. Volchihin V. I., Dr. Sci. (Tech.), Prof. **Executive secretary:**

Lysenko A. V.

Editorial staff: Chugunova A. V.

Grigorin-Ryabova E. V.

Address:

4, Stromynsky Lane, Moscow, 107076, Russia. Tel/Fax: +7(499)269-55-10. Web: www.microsistems.ru/eng; e-mail: nmst@novtex.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 and international data base Scopus

Published since November 1999

CONTENTS

3

MODELLING AND DESIGNING OF MNST

Gridchin V. A., Vasilyev V. Yu., Chebanov M. A., Byalik A. D., Chernov A. S. A numerical simulation of the photoelectric fiber optic pressure sensor compnents.

Sivchenko A. S., Kuznetsov E. V. Methods of Analysis of the Main Characteristics of a CMOS IC Reliability Using Test Structures on Wafers . . .

Roslyakov A. S. Feasibility Study for Low Power IP Blocks for the Solution of Finite-Difference Equations in Low-Frequency Signal Conversions . . . 10

Galperin V. A., Razzhivin N. A. Research of the Plasma Gate Resist Trim-

SCIENCE OF MATERIALS AND TECHNOLOGICAL BASICS OF MNST

Galperin V. A., Gromov D. G., Lebedev E. A., Shulyatiev A. S., Smirnov D. I., Shilyaeva Yu. I. Size Effect in Multilayer Thin Film Thermite Materials Based on Aluminum-Copper Ni-

Bogdanova D. A., Bulyarskii S. V., Basaev A. S. The Modification of HOMO-LUMO Gap of Single-Walled Carbon Nanotubes under the Hydrogen Chemi-

Chuyko O. V., Kuznetsov E. V., Saveliev M. I., Komarova N. V., Sirotkina M. S. Technology Integrated CMOS Microfluidic Systems with Nanowire Sensing Elements 23

Vankov V. A., Zemlyannikov N. S., Sukhanov V. S. State-of-Art Technologies and Approaches for Transceiver Galiev G. B., Klimov E. A., Lavrukin D. V., Yachmenev A. E., Gali-ev R. R., Ponomarev D. S., Khabibullin R. A., Fedorov Yu. V., Bugaev A. S. Fabrication and Investigation of the Photoconductive Antennas Based on A3B5 Semiconductors Grown by MBE with 28 the Low-Temperature Regime

Nº 6

(167)

2014

MICRO- AND NANOSYSTEM **TECHNIQUE ELEMENTS**

Maltsev P. P., Maytama M. V., Pavlov A. Y., Shchavruk N. V. Calculate and Manufacturing Narrowband RF Microelectromechanical Systems (MEMS) Switches for Frequency 10-12 GHz on Gallium Arsenide Substrate 30

Galperin V. A., Gromov D. G., Kitsyuk E. P., Markeev A. M., Lebe-dev E. A., Chernikova A. G., Dub-kov S. V. CNT-based Supercapacitor with Thin Metal Oxide Layers Pseudo-33 capacity

Antonov A. A., Karpovich M. S., Pichugin I. V., Kurlenko A. A., Vasilyev V. Yu. Integrated Circuit Driver for Power Key Soft-Switching in Power Converters . 37

Sukhanov A. V., Prokofiev I. V., Gusev D. V. Multi-Agent Monitoring System of Web-Sensors Based on Nano-42 sensorics . .

Fedorov R. A. Microcircuit for Radiation Protection Module Management. 46

Platonov K. V. Micro Assemblies with Integrated Passive Devices on Silicon Substrate. 48

Malashevich N. I. Development of Methods for Integration of RAM in the Gate Array for Space Application . . 50

Gusev D. V., Danilova N. L., Zemlyannikov N. S., Sukhanov V. S. Multi-channel Tensoresistive Pressure Trans-52

SISTEMS ON CHIP

Belyaev S. V., Shamanaev P. A., Shcherbakov S. V. Software Module for Configuration of SoC 55

—— НАНО- И МИКРОСИСТЕМНАЯ ТЕХНИКА, № 6, 2014 –

2

Моделирование и конструирование MHCT Modelling and designing of MNST

УДК 681.5.08

В. А. Гридчин¹, д-р техн. наук, проф., **В. Ю. Васильев²**, д-р хим. наук, зам. директора, **М. А. Чебанов²**, науч. сотр., **А. Д. Бялик²**, канд. техн. наук, науч. сотр., **А. С. Чернов²**, аспирант, инж.-констр. ¹ Новосибирский государственный технический университет ² ООО "РАМИТ", г. Новосибирск

e-mail: vladislavvasilyev@gmail.com, chebanov100@gmail.com

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ЭЛЕМЕНТОВ ФОТОЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКОГО СЕНСОРА ДАВЛЕНИЯ

Представлена численная модель оптомеханического узла фотоэлектрического сенсора давления, состоящего из профилированной кремниевой диафрагмы с жестким центром и оптоволокна. Методом конечно-элементного моделирования исследованы условия максимальной чувствительности по смещению свободного конца оптоволокна под действием давления в зависимости от размеров диафрагмы. Показано, что для достижения максимальной чувствительности по перемещению оптоволокна расположение жесткого центра может быть нецентральным и зависит от размеров диафрагмы. Рассмотрены особенности преобразовательной характеристики при использовании в составе фотоэлектрического сенсора давления одного либо двух фотодиодов в дифференциальном включении.

Ключевые слова: оптоволокно, фотоэлектрический сенсор давления, метод конечных элементов

Введение

Сенсоры давления являются широко распространенными компонентами измерительных систем. Их выпуск непрерывно растет и по оценкам компании Yole Development объем рынка к 2018 г. ожидается на уровне 3 млрд долл. по сравнению с 1,9 млрд в 2012 г. [1]. Несмотря на длительную историю развития, поиск новых конструктивно-технологических решений для них продолжается и сейчас, что вызвано растущими требованиями к точности измерений и расширением областей применения. Это в полной мере относится и к оптоволоконным сенсорам давления, которые целесообразно применять в агрессивных и взрывоопасных средах, а также в условиях сильных электромагнитных помех. Вопросы проектирования таких сенсоров рассмотрены в ряде работ [2-4]. Технологии микросистемной техники позволяют создавать новые конструкции оптоволоконных сенсоров давления. Как правило, в них реализуется модуляция светового потока, направленного по нормали к перемещающемуся упругому элементу в форме квадратной или круглой диафрагмы [5-7].

В ряде работ была выдвинута и реализована иная концепция построения сенсора давления. В них оптоволокно латерально смещалось относительно устройства модулирующего излучения (край зеркала, флюоресцентный источник, два стекла с разными оптическими характеристиками) [8—10]. Наиболее полно микросистемная технология была реализована в сенсоре давления, где перемещение оптоволокна преобразовывалось в изменение светового потока фотодиода, работающего в режиме холостого хода [11, 12]. Такой фотоэлектрический сенсор является самогенерирующим, а электрическая форма выходного сигнала упрощала его обработку и сопряжение с выходными цепями. Авторы работы [11] обнаружили немонотонность преобразовательной характеристики сенсора, но объяснения этому не дали. Полученные результаты с очевидностью указывают на необходимость конструктивной оптимизации сенсоров, реализованных по концепции "латерально смещающееся оптоволокно — неподвижный фотодиод".

В связи с этим сначала рассмотрена предложенная конечно-элементная модель оптомеханического узла фотоэлектрического сенсора давления (профилированная кремниевая диафрагма с жестким центром + оптоволокно), которая применена для конструктивной оптимизации узла по чувствительности к смещению, а затем рассмотрены особенности преобразовательной характеристики сенсора при использовании фотодиодов.

1. Численная модель оптомеханического узла

Оптомеханический узел включает толстую рамку и квадратную диафрагму с квадратным жестким центром, сформированные из кремниевой (100) пластины по стандартной технологии жидкостного травления в водном растворе КОН. На поверхности кремниевой структуры создана V-канавка, где размещается оптоволокно. Опто-



Рис. 1. Конечно-элементная модель оптомеханического узла: в точках А и В жесткая связь оптоволокна и кремниевой диафрагмы

волокно имеет свободный конец длиной l_0 , отсчитываемый относительно середины жесткого центра, где оптоволокно имеет жесткую связь с кремнием. Другая точка жесткого закрепления оптоволокна находится на контуре толстой рамки.

Численное моделирование оптомеханического узла проводили в пакете программ ANSYS (11 версия) методом конечных элементов. Симметрия структуры позволила ограничиться расчетом 1/2 ее части. Модель была составлена из конечных элементов второго порядка SOLID186, которые предназначены для твердотельных структур с возможностью учета анизотропных упругих свойств материала. Элемент SOLID186 имеет форму гексаэдра с узловыми точками, расположенными в его вершинах и по одной на каждом ребре. Каждый узел имеет три степени свободы — перемешения в ортогональных направлениях. В целях повышения эффективности вычислений и более рационального использования ресурса конечных элементов из модели была исключена толстая рамка упругого элемента (рис. 1). При моделировании она была заменена на эквивалентные условия полного ограничения в перемещениях контура диафрагмы и сопряженного неподвижного конца оптоволокна. Область крепления оптоволокна к жесткому центру диафрагмы описана асимметричной контактной парой неразрывной связи — bonded. Нагрузка в виде измеряемого давления Рбыла приложена к обратной стороне диафрагмы.

Анизотропные упругие свойства кремниевой диафрагмы были определены полной матрицей упругих постоянных с тремя независимыми компонентами, которые в главных кристаллографических осях [100] имеют следующие значения: $C_{11} = 1,66 \cdot 10^{11}$ Па; $C_{12} = 6,4 \cdot 10^{10}$ Па; $C_{44} = 8 \cdot 10^{10}$ Па. Упругие свойства оптоволокна были заданы изотропным модулем Юнга E = 69 ГПа и коэффициентом Пуассона v = 0,2 [13].

Вычислительный эксперимент был составлен таким образом, чтобы выявить оптимальное положение жесткого центра, при котором наблюдался максимум отклонения свободного конца оптоволокна. При этом размеры диафрагмы в плоскости были фиксированы (2 × 2 мм), а ее толщина варьировалась в диапазоне от 20 до 120 мкм с шагом 20 мкм. Оптоволокно диаметром 125 мкм вложено в V-канавку шириной 153 мкм и глубиной 108 мкм.

Для выявления степени влияния квадратного жесткого центра на отклонение оптоволокна его размер в расчетах принимали равным 500, 750 и 1000 мкм.

2. Обсуждение результатов моделирования

Смещение края оптоволокна под действием измеряемого давления является сложной функцией набора конструктивных параметров как кремниевого упругого элемента (размеры диафрагмы, параметры жесткого центра, в том числе углы скоса), так и оптоволокна. Толщина применяемых оптоволокон ($d \approx 125$ мкм) вполне сопоставима с толщиной диафрагмы упругого элемента, что в сочетании с закреплением оптоволокна на жестком центре приводит не только к смещению свободного конца оптоволокна w_0 по нормали к плоскости диафрагмы, но и к повороту торца на небольшой угол β (tg $\beta \approx \beta$):

$$w = w_0 + \beta l_0, \tag{1}$$

где *l*₀ — длина свободного конца оптоволокна.

Вклад каждого из слагаемых в выражении (1) в общую чувствительность S = w/P оптомеханического узла может быть различен и зависит от конструктивных размеров узла. Моделирование показывает, что увеличение S может быть достигнуто не только увеличением размера диафрагмы (и соответственно, l_0), но и смещением жесткого центра в плоскости диафрагмы относительно ее центра.

На рис. 2, *а* и б приведены зависимости чувствительности *S* от смещения жесткого центра для двух размеров диафрагмы 2×2 мм и 4×4 мм при одинаковой толщине. Для диафрагмы 2×2 мм смещение позволяет увеличить чувствительность на 20 %. В этом случае сочетание

поворота оптоволокна на угол в (соответствующая чув-

ствительность $S_{\beta} = \frac{l_0 \beta}{P}$) и его нормального смещения w_0 (чувствительность $S_w = w_0/P$) достигает максимума при смещении жесткого центра относительно центра диафрагмы на 200 мкм. Для диафрагмы 4 × 4 мм основную роль играет смещение w_0 , а не поворот β . В этом случае центральное расположение жесткого центра является оптимальным.

Чувствительность к давлению оптомеханического узла в основном определяется отношением размера стороны диафрагмы к ее толщине, а размеры жесткого центра оказывают существенно меньшее влияние. На рис. 3 приведена зависимость чувствительности S от толщины диафрагмы при размере ее сторон 2 × 2 мм. Размер стороны квадратного основания жесткого центра является вариабельным параметром. Видно, что заметный рост чувствительности наблюдается при толщинах диафрагмы меньше 50 мкм. При этом увеличение в 2 раза размера жесткого центра уменьшает чувствительность не более чем на 17,5 %.

3. Фотоэлектрический узел

Применение в выходной цепи фотодиода вместо оптоволокна влияет на особенности преобразовательной характеристики фотоэлектрического сенсора давления. Микросистемная технология открывает широкие возможности для новых конструктивных решений фотодиодов в составе сенсора, однако к настоящему времени какой-либо количественный анализ в этом направлении отсутствует.

Рассмотрим особенности преобразовательной характеристики при использовании в составе фотоэлектрического сенсора давления одного либо двух фотодиодов в дифференциальном включении. Для упрощения далее будет рассмотрен случай нормального падения светового потока на фотодиод со световым пятном в форме круга радиуса *R*.

На рис. 4 представлены два варианта расположения фотодиодов: а) одиночный и узкий, у которого $h \ll R$ и w = 2R; б) два фотодиода, разделенных промежутком $\delta \ll R$, у которых h > R и w = 2R, где R — радиус светового пятна от оптоволокна на фотодиоде. Случай "а" приближенно соответствует результатам работы [11].

Узкий фотодиод (случай "а"). Выходной электрический сигнал пропорционален площади засветки *S* фотодиода световым пятном оптоволокна:

$$U_B = K \frac{S}{S_{\oplus}},$$



Рис. 2. Зависимость чувствительности отклонения свободного конца оптоволокна от положения жесткого центра x_b относительно средней точки диафрагмы размером 2 × 2 мм (*a*) и 4 × 4 мм (*б*). Толщина диафрагмы H = 20 мкм, высота жесткого центра $H_b = 150$ мкм, сторона жесткого цента $L_b = 1000$ мкм

где S_{Φ} — общая площадь фотодиода; K — коэффициент, учитывающий особенности светового пятна, электрические и конструктивные параметры фотодиода.

При идеальном расположении фотодиода и оптоволокна (круговое световое пятно, которое при давлении P = 0 касается границы фотодиода), отношение площадей $F = S/S_{\phi}$ при смещении *z* центра пятна относительно фотодиода имеет следующий вид:

$$F(z) = \frac{R^2}{2wh} [f(x_1) - f(x_2)], \qquad (2)$$

где $f(x) = x - \sin(x)$ при $0 \le x \le 2R$, $x_1 = 2\arccos\left(1 - \frac{z}{R}\right)$, $x_2 = 2\arccos\left(1 - \frac{z - h}{R}\right)$.

Соотношение (2) справедливо при смещениях $z \ge h$. Если $z \le h$, то в (2) необходимо положить $x_2 = 0$.

На рис. 5 приведен общий вид F, когда смещение не превосходит диаметр светового пятна. Зависимость имеет максимум при z = R + h/2. Если при z = 0 уже су-



Рис. 3. Зависимость чувствительности смещения свободного конца оптоволокна от толщины диафрагмы H, при оптимальном положении жесткого центра. Площадь диафрагмы 2 × 2 мм, высота жесткого центра $H_b = 150$ мкм, длина $L_b = 500$, 750, 1000 мкм



Рис. 4. Варианты расположения фотодиодов относительно светового пятна:

a — одиночный узкий, $h \ll R$, w = 2R; δ — два широких фотодиода: h > R, w = 2R, δ — зазор между фотодиодами



Рис. 5. Вид функции F(z) при R = 60 мкм и h = 10 мкм

ществует засветка фотодиода, то имеется начальный выходной сигнал, а зависимость F(z) становится несимметричной.

Два фотодиода в дифференциальном включении (случай "б"). При одинаковых электрофизических и топологических параметрах фотодиодов выходной сигнал фотоэлектрического сенсора давления пропорционален разности площадей засветки каждого фотодиода:

$$U = K\left(\frac{S_1 - S_2}{S_{\Phi}}\right) = K[F_1(z) - F_2(z)].$$

Если центр светового пятна находится посредине зазора шириной δ между фотодиодами (идеальное расположение оптоволокна при P = 0), то засветка фотодиодов одинакова и выходной сигнал равен нулю. При смещении центра светового пятна на величину *z* выходной сигнал $U \neq 0$ и функции $F_1(z)$ и $F_2(z)$ определяются следующими соотношениями:

если 0 ≤ z ≤ δ/2, то

$$F_1(z) = \frac{R^2}{2wh} f(x), \quad x = 2\arccos\left(\frac{\delta}{2R} - \frac{z}{R}\right);$$

$$F_2 = 0;$$

если δ/2 ≤ z ≤ R − δ/2, то

$$F_1(z) = \frac{\pi R^2}{wh} - \frac{R^2}{2wh} f(x), \quad x = 2\arccos\left(\frac{z}{R} - \frac{\delta}{2R}\right);$$

$$F_2(z) = \frac{R^2}{2wh} f(x), \quad x = 2\arccos\left(\frac{z}{R} + \frac{\delta}{2R}\right).$$

Смещение *z* имеет верхнюю границу $z_{\max} \leq R - \delta/2$, когда $F_2 = 0$ и второй фотодиод уже не освещается и дифференциальное включение перестает работать.

На рис. 6 представлена зависимость разности $F_1(z) - F_2(z)$ от смещения центра светового пятна. Зависимость носит монотонный характер. Источником начального выходного сигнала являются неодинаковые засветки фотодиодов при P = 0 и возможные отличия электрофизических характеристик пары фотодиодов.



Рис. 6. Вид функции F(z) при R = 60 мкм, h = 100 мкм и $\delta = 10$ мкм

Заключение

Представлена численная модель оптомеханического узла фотоэлектрического сенсора давления с профилированной кремниевой диафрагмой и оптоволокном. Показано, что для достижения максимальной чувствительности по перемещению оптоволокна расположение жесткого центра может быть нецентральным и зависит от размеров диафрагмы.

Применение одиночного фотодиода имеет следствием немонотонность преобразовательной характеристики.

Применение двух фотодиодов в дифференциальном включении обеспечивает монотонность преобразовательной характеристики с меньшей нелинейностью, чем для одиночного фотодиода.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования и науки РФ в рамках реализации НИР "Исследование перспективных конструкций и технологических принципов формирования оптоэлектронных приборов нового поколения (кремниевый фотоэлектрический датчик давления)" (ГК № 14.430.12.0005).

Список литературы

1. Yole Developpement: MEMS Pressure Sensor report. April 2013.

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

3. Мурашкина Т. И. Амплитудные волоконно-оптические датчики автономных систем управления. Пенза: Информационно-издательский центр ПГУ, 1999. 173 с.

4. Бадеева Е. А., Гориш А. В., Котов А. Н., Мурашкина Т. И., Пивкин А. Г. Теоретические основы проектирования амплитудных волоконно-оптических датчиков давления с открытым оптическим каналом. М.: МГУЛ, 2004. 246 с.

5. Гридчин В. А., Бялик А. Д. Особенности проектирования амплитудных волоконно-оптических датчиков давления, использующих кремниевые мембранные чувствительные элементы // Приборы. 2005. № 7 (61). С. 25—29.

6. Гридчин В. А., Бялик А. Д. Математическое моделирование мембранных чувствительных элементов амплитудных волоконно-оптических датчиков давления // Автометрия. 2005. Т. 41. № 3. С. 56—63. 7. **Корляков А. В.** Мембраны для приборов микросистемной техники // Петербургский журнал электроники. 2006. № 4. С. 62–73.

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

V. 17, Is. 1–2. P. 157–166. 9. **Gustafsson K., Hök B.** A fibre optic pressure sensor in silicon based on fluorescence decay // Sensors and Actuators. 1989. V. 19, Is. 4. P. 327–332.

10. Бонцаенко В. Е., Виговская Т. В., Кокин Е. П., Смирнов А. А., Сурин Ю. В. Интегральный преобразователь дав-

ления: пат. РФ № 2186438, кл. H01L29/84, приоритет от 21.06.2001.

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

12. **Dziuban J. A.** Bonding in Microsystem Technology. Springer, 2006. 349 p.

13. Antunes P., Domingues F., Granada M., André P. Mechanical Properties of Optical Fibers // Selected Topics on Optical Fiber Technology / Dr Moh. Yasin (Ed.). InTech, 2012. P. 538–550.

V. A. Gridchin¹, Dr. Sci. (Tech.), Prof., V. Yu. Vasilyev², Dr. Sci. (Chem.), Prof., M. A. Chebanov², Researcher, A. D. Byalik², As. Prof., A. S. Chernov², Grad. Stud. ¹ Novosibirsk State Technical University

² LLC "RAMIT", Novosibirsk

A NUMERICAL SIMULATION OF THE PHOTOELECTRIC FIBER OPTIC PRESSURE SENSOR COMPNENTS

A numerical model of an optomechanical unit of the photoelectrical pressure sensor is presented in this paper. The optomechanical unit consists of a bulk micromachined bossed silicon diaphragm and an optical fiber. The research of conditions when pressureactuated optical fiber free end displacement reach its maximum is performed by means of finite element method. It is shown that maximum sensitivity of the optical fiber free end displacement to an applied pressure can be achieved by proper location of a boss relative to diaphragm center with dependence on the diaphragm thickness. Features of output characteristics of the photoelectric pressure sensor with single photodiode and one with couple photodiodes operating in differential mode are considered in the scope of this paper.

Keywords: optical fiber, photoelectrical pressure sensor, finite element method

УДК 621.3.049.77

А. С. Сивченко, мл. науч. сотр., Е. В. Кузнецов, нач. лаб., e-mail: asivchenko@yandex.ru НПК "Технологический центр"

МЕТОДИКИ АНАЛИЗА ОСНОВНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК НАДЕЖНОСТИ В КМОП ИС С ПОМОЩЬЮ ТЕСТОВЫХ СТРУКТУР В СОСТАВЕ ПЛАСТИН

Представлены методики, позволяющие с помощью ускоренных измерений тестовых структур в составе пластин определять время наработки до отказа линии металлизации и деградацию параметров МОП-транзисторов под действием горячих носителей. Также в работе представлена методика, позволяющая определять дефектность подзатворного диэлектрика.

Ключевые слова: надежность, отказ, металлизация ИС, горячие носители, дефектность

В настоящие время основной тенденцией увеличения производительности интегральных схем (ИС) является непрерывное уменьшение топологических размеров. Однако, вместе с этим, вопросы надежности выпускаемых схем становятся все более актуальными, так как уменьшение размеров приводит к проявлению новых физических механизмов отказа. Поэтому на полупроводниковых фабриках при переходе к меньшим проектным нормам проводится разработка методов по анализу вновь возникающих типов отказов и увеличению надежности выпускаемой продукции.

Основные явления, определяющие надежность КМОП ИС, условно можно разделить на следующие: зависимый

от времени пробой диэлектрика (TDDB), горячая инжекция носителей (HCI), электромиграция проводящих шин (EM) [1].

В ходе работы нами разработаны методики по контролю электромиграции проводящих шин, горячей инжекции носителей в МОП-транзисторах и зависимого от времени пробоя диэлектрика. В основе методик лежат алгоритм получения необходимых параметров, тестовые структуры и программа измерений, позволяющая проводить измерения тестовых структур в автоматическом режиме [2].

Для контроля электромиграции проводящих шин разработана методика контроля. Целью методики является определение времени наработки до отказа линии металлизации под действием электромиграции.

Для проведения измерений спроектированы специальные тестовые структуры. Каждая из них направлена на один доминирующий механизм отказа: электромиграция в контактном окне, в длинной линии, в линии на рельефе.

Дизайн тестовых структур разработан с учетом размещения их в составе пластин и возможностью тестирования при высоких значениях ускоряющих факторов деградации. За основу алгоритма тестирования выбран изотермический тест [3]. Данный вид испытаний на электромиграцию относится к высокоускоренным испытаниям, в котором основными ускоряющими факторами является высокая плотность тока и высокая температура тестовой линии. Основным преимуществом данного алгоритма является быстрое получение параметров модели электромиграции и хорошая корреляция полученных данных с более долгими классическими алгоритмами контроля [3].

Во время тестирования при воздействии тока на структуру происходит нагрев тестовой линии до заданной эффективной температуры. В процессе стресс-тестирования за счет электромиграционного разрушения сопротивление тестовой линии непрерывно возрастает, и при подаче постоянного тока, как это делается в классических алгоритмах контроля, рассеиваемая мощность в структуре увеличивается, тем самым проявляется эффект локального саморазогрева структуры. Применяемый алгоритм лишен данного недостатка, так как за счет цикла обратной связи происходит непрерывный контроль рассеиваемой мощности и снижение подаваемого тока при пропорциональном увеличении сопротивления тестовой линии. Отказ линии определяется как резкое увеличение сопротивления. Анализ отказов проводится с учетом их логнормального распределения и уравнения Блэка, на основе которого определяется время наработки до отказа проводящей линии:

$$t_{50} = A J^n \exp\left(\frac{E_a}{kT}\right),\tag{1}$$

где t_{50} — среднее время наработки до отказа; J — плотность тока в металлической линии; n — параметр модели для плотности тока; E_a — энергия активации процесса электромиграции; T — температура тестовой линии; A — константа; k — постоянная Больцмана.

В предположении, что плотность тока постоянна, преобразуем уравнение (1) к виду

$$\ln(t_{50}) = \frac{E_{a}}{k} \frac{1}{T} + C,$$
(2)

где *С* — константа.

Уравнение (2) носит линейный характер, поэтому для нахождения E_a необходимо построить зависимость $\ln(t_{50})$ от 1/T и с помощью линейной аппроксимации по методу наименьших квадратов рассчитать значение E_a .

В предположении, что температура тестовой линии в уравнении Блэка постоянна, преобразуем формулу (1) к виду

$$\ln(t_{50}) = -n\ln(J) + B,$$
(3)

где *В* — константа.

Уравнение (3) носит линейный характер, поэтому для нахождения *n* необходимо построить зависимость $\ln(t_{50})$ от $\ln(J)$ и с помощью линейной аппроксимации по методу наименьших квадратов рассчитать значение *n*.

Для расчета E_a проводится выборка измерений при различных температурах тестовой линии и постоянной плотности тока, а для расчета n — при различных плотностях тока и постоянной температуре. На практике измеренные значения параметров моделей для Al тестовой линии составляют $n \approx 2$ и $E_a \approx 0.6$.

Деградация параметров МОП-транзисторов под действием горячей инжекции носителей (HCI) является важной проблемой в обеспечении надежности современных ИС. В результате увеличения функциональности ИС за счет масштабирования происходит непрерывное снижение длины канала в МОП-транзисторах, что приводит к возникновению больших электрических полей в нем и появлению горячих носителей в канале вблизи области стока. Электрическое поле разгоняет носителей в канале транзистора до высокой эффективной температуры, и носители в таком поле приобретают высокую энергию, поэтому их называют горячими. При движении в канале они передают свою энергию решетке, в результате чего разрушается связь Si—SiO₂, а также они могут быть захвачены на ловушках в SiO2. Захват носителей или разрыв связей меняет заряд диэлектрика и создает поверхностные ловушки в SiO₂, что критически сказывается на производительности транзистора и ухудшает его основные характеристики: крутизну, пороговое напряжение, ток стока и др. Скорость изменения каждого параметра зависит от топологических особенностей транзистора и технологических особенностей его изготовления.

Для эффективной оценки транзисторов на стойкость к деградации под действием горячих носителей нами разработана методика контроля. Целью методики является определение времени наработки до отказа при заданных условиях эксплуатации наиболее чувствительного параметра транзистора к деградации под действием горячих носителей.

В качестве тестовых структур для измерений выступают *n*МОП- и *p*МОП-транзисторы с минимальной допустимой длиной канала, которую обеспечивает применяемая технология.

В качестве ускоряющих величин используются высокие значения V_{ds} и V_{gs} , обеспечивающие большую напряженность электрического поля по оси *x* и *y* соответственно. Во время теста к структуре прикладываются стрессовые воздействия V_{ds} и V_{gs} , далее после каждого цикла стресса контролируемые параметры измеряют и сравнивают их с первоначальными значениями. Выход из стрессовой фазы и дальнейший анализ данных происходит после того, как ухудшение одного из контролируемых параметров достигает критерия выхода либо заканчивается общее время, отведенное на стрессовые циклы. В качестве моделей отказа в методике используется модель соотношения токов подложка—сток или, как ее еще называют, Lucky Electron Model (LEM) [4]. Согласно данной модели время наработки до отказа определяется формулой

$$t_{50} = \frac{HW}{I_d} \left(\frac{I_b}{I_d}\right)^{-m},\tag{4}$$

где t_{50} — среднее время наработки до отказа; H и m — параметры модели; W — ширина транзистора; I_b и I_d — ток подложки и ток стока при стрессовых параметрах.

Если измерения проводятся на транзисторах с одинаковой шириной канала, то величина W может быть объединена с параметром H, тогда формулу (4) можно привести к виду

$$\ln\left(\frac{t_{50}I_d}{W}\right) = \ln(H) - m\ln\left(\frac{I_b}{I_d}\right).$$
 (5)

Уравнение (5) носит линейный характер, поэтому для нахождения параметров моделей необходимо провести выборку измерений при различных параметрах стресса и путем линейной аппроксимации по методу наименьших квадратов рассчитать значение H и m. Значение параметров моделей зависит от технологии и параметров стресса и в наших измерениях составляло $m \approx 3$, $H \approx 10^{-3}$.

Оценка качества подзатворного диэлектрика МОПтранзисторов проводится с помощью методов зависимого от времени пробоя диэлектрика (TDDB) и является важной задачей в увеличении надежности МОП-транзисторов [5]. Целью разработанной методики являются оценка плотности привнесенной дефектности в диэлектрик и определение его времени наработки до отказа.

В качестве тестовых структур для измерения используются МОП-конденсаторы различной площади и различным соотношением периметров по границе изоляции и диффузии. Такой набор тестовых структур позволяет разделить дефекты с точки зрения границы их расположения и выявить источник привносимых дефектов. Методика по контролю дефектности диэлектрика основана на измерении падения напряжения МОП-структуры под воздействием ступенчато возрастающего тока и расчета заряда Q_{bd} , инжектированного в диэлектрик до момента пробоя:

$$Q_{bd} = \int_{t=0}^{t=t_{bd}} Idt,$$
(6)

где I — стрессовый ток, воздействующий на структуру; t_{bd} — время, прошедшее с начала тестирования до пробоя.

Для определения дефектности оксида необходимо провести выборку измерений и построить накопительное распределение заряда пробоя в предположении, что вид функции распределения заряда $F(Q_{bd})$ имеет распределение Вейбулла. Накопительное распределение будет

носить бимодальный характер, т. е. является суперпозицией двух функций распределения, одна из которых связана с внутренними дефектами, генерирующимися под действием электрического поля, а другая — с внешними дефектами, привнесенными в процессе производства. Проводя линейную аппроксимацию накопительного распределения, можно найти точку, разделяющую два распределения, с помощью которой рассчитывается привнесенная дефектность. В разработанной методике для расчета дефектности используется распределение Пуассона (7), однако возможно использовать более сложные распределения [6]:

$$D = \frac{\ln(1-F)}{S},\tag{7}$$

где D — рассчитанная плотность внешних дефектов; F — точка разделения двух распределений (процент дефектных структур по подзатворному оксиду); S — площадь диэлектрика тестовой структуры.

На практике привнесенная плотность дефектов должна иметь как можно более низкие значения.

С помощью разработанных методик были получены параметры моделей отказов и оценена дефектность диэлектрика. Данные методики прошли апробацию в производстве НПК "Технологический центр" и используются для анализа основных характеристик надежности и совершенствования технологического процесса.

Список литературы

1. **Ohring M.** Reliability and Failure of Electronic Materials and Devices. Academic Press, 1998. Ch. 5. P. 259.

2. Сивченко А. С. Разработка методов мониторинга параметров технологических процессов и анализ отказов с помощью ускоренных методов измерений тестовых структур в составе пластин // Тр. 15-й Российской научно-технической конф. "Электроника, микро- и наноэлектроника". М.: Изд-во МИФИ. 2013. 64 с.

3. **Standart** JEDEC Isothermal Electromigration Test Procedure JESD61A.01. October 2007.

4. **Hu C.** A lucky-electron model of hot-electron emission, in International Electron Devices // Meeting Technical Digest. 1979. P. 22–25.

5. **Stathis J. H.** Physical and predictive models of ultrathin oxide reliability in CMOS devicesand circuits // IEEE Transactions on Device and Materials Reliability. 2001. V. 1. P. 43–59.

6. Зи С. М. Технология СБИС. В 2-х кн. Кн. 2: Пер. с англ. / Под ред. Ю. Д. Чистякова. М.: Мир, 1986. С. 397—403.

A. S. Sivchenko, Junior Researcher, **E. V. Kuznetsov**, Head of Laboratory, Scientific-Manufacturing Complex "Technology Center" MIET

METHODS OF ANALYSIS OF THE MAIN CHARACTERISTICS OF A CMOS IC RELIABILITY USING TEST STRUCTURES ON WAFERS

The paper presents techniques that allow measurements using accelerated test structures consisting of wafer plates to determine the time to failure time line metallization and degradation parameters of MOS transistors by hot carriers. Also work presents a methodology that allows to determine the defects of gate dielectric.

Keywords: reliability, failure, IC metallization, hot carriers, defectiveness

А. С. Росляков, мл. науч. сотр., НПК "Технологический Центр", Москва e-mail: all.roslyakov@gmail.com

ИССЛЕДОВАНИЕ ВОЗМОЖНОСТИ СОЗДАНИЯ НИЗКОПОТРЕБЛЯЮЩИХ СФ БЛОКОВ ДЛЯ РЕШЕНИЯ КОНЕЧНО-РАЗНОСТНЫХ УРАВНЕНИЙ В ПРЕОБРАЗОВАНИЯХ НИЗКОЧАСТОТНЫХ СИГНАЛОВ

Преобразование низкочастотного сигнала традиционно можно осуществить двумя способами: цифровым и аналоговым. В статье рассматривается исследование возможности создания низкопотребляющих сложно-функциональных (СФ) блоков для аналогового преобразования низкочастотных сигналов. Применение в конечно-разностных уравнениях схем на переключаемых конденсаторах позволяет снизить потребление за счет отсутствия аналого-цифрового преобразователя. Использование различных схемотехнических решений может значительно уменьшить ток потребления СФ блоков.

Ключевые слова: низкопотребляющие СФ блоки, дискретная система, схемы на переключаемых конденсаторах

Все сигналы, которые окружают человека, имеют аналоговую природу. При считывании и преобразовании информации может происходить ее частичная потеря, и главная задача заключается в том, чтобы осуществить это преобразование с минимальными потерями и минимальными энергозатратами. Одним из методов преобразования сигналов является метод, основанный на дискретизации аналогового сигнала и дальнейшем преобразовании последовательности дискретных отсчетов. Системы, имеющие такие свойства, называются дискретными. В таких системах также можно выделить два принципиально разных метода преобразования последовательности дискретных отсчетов.

Первый метод подразумевает преобразование отсчетов в цифровом виде с помощью различных логических устройств. Отсчеты представлены в виде двоичных слов, полученных при дискретном преобразовании сигнала с помощью аналого-цифрового преобразователя (АЦП).

Второй метод осуществляет преобразование отсчетов с помощью аналоговой схемы, которые можно рассматривать как дискретные, если при этом описывающее их дифференциальное уравнение заменить соответствующим уравнением в конечных разностях. Это делается при разработке алгоритмов функционирования таких систем, причем блок-схема алгоритма легко может быть заменена функциональной электрической схемой, содержащей умножители, сумматоры, а также элементы памяти, в которых сохраняются отсчеты сигнала и числовые параметры алгоритма [1].

Применение схемотехники на переключаемых конденсаторах в сравнении с другими схемотехническими решениями значительно упрощает выполнение некоторых операций, связанных с преобразованием сигналов [2].

Рассмотрим реализацию функции задержки на один такт. В полностью цифровых схемах, относящихся к первому методу преобразования сигнала, дискретизацией системы занимается АЦП. После этого отсчеты пропускаются через сдвиговой регистр на один такт. Структурная схема преобразования сигнала в цифровых схемах представлена на рис. 1.

Функции задержки на аналоговых элементах можно легко построить с помощью операционных усилителей с

применением схемотехники на ПК. На рис. 2 представлена схема задержки аналоговых отсчетов на один такт.

В НПК "Технологический центр" был разработан элемент задержки на один такт на КМОП-технологии 0,18. На рис. 3 представлены результаты моделирования при подаче на вход синусоидального сигнала с частотой 1 кГц. Частота дискретизации составляет 64 кГц.

Схемы на ПК используют частоту тактирования для переключения ключей. Чаще всего применяется схема, генерирующая из исходного синхросигнала две последовательности С и NC неперекрывающихся импульсов. Помимо этого была предложена схема тактирования операционного усилителя (OУ), позволяющая снизить



Рис. 1. Структурная схема преобразования функции задержки сигнала на один такт в цифровых схемах



Рис. 2. Схема задержки на один такт

энергопотребление, в которой операционный усилитель после выполнения операции отключается. Для этого скважность управляющих импульсов ключей была снижена до 17 %. Скважность импульсов VC тактирования питания — до 50 %.

На рис. 4 представлены управляющие сигналы тактирования и управление питания.

Для хранения сигнала на выходе усилителя во время отключения питания необходимо добавить емкость с ключом. На рис. 5 представлена модификация схемы задержки на один такт.

Результаты моделирования модифицированной схемы показаны на рис. 6.

Ток потребления модифицированной схемы задержки на один такт по отношению к исходной аналоговой схеме снизился на 63 % при сохранении всех прочих параметров.

Применение в дискретных системах аналоговых сложно-функциональных ($C\Phi$) блоков позволяет снизить энергопотребление за счет отсутствия дискретного преобразования, выполняемого аналого-цифровым преоб-



Рис. 3. Временная диаграмма работы аналоговой схемы задержки на один такт



Рис. 4. Управляющие сигналы тактирования и управление питания



Рис. 5. Модифицированная схема задержки на один такт



Рис. 6. Временное моделирование работы модифицированной схемы задержки на один такт

разователем. Использование схем на переключаемых конденсаторах в сравнении с другими схемотехническими решениями может упростить выполнение некоторых операций, связанных с преобразованием сигналов. Рассмотренная схема тактирования для управления схемы на переключаемых конденсаторах показала снижение энергопотребления СФ блоков больше чем в 2 раза.

Список литературы

1. **Мулявка Я.** Схемы на операционных усилителях с переключаемыми конденсаторами. М.: МИР, 1992. 416 с.

2. Гауси М., Лакер К. Активные фильтры с переключаемыми конденсаторами: Пер. с англ. М.: Радио и связь, 1986. 168 с.

A. S. Roslyakov, Junior Research,

Scientific-Manufacturing Complex "Technological Center" MIET

FEASIBILITY STUDY FOR LOW POWER IP BLOCKS FOR THE SOLUTION OF FINITE-DIFFERENCE EQUATIONS IN LOW-FREQUENCY SIGNAL CONVERSIONS

Low-frequency signal conversion can be traditionally realized in two ways: digital or analog. This article presents the feasibility study for low power IP blocks for the analog conversion of low-frequency signals. Switched capacitor (SC) circuits application in finite-difference equations makes it possible to reduce power consumption due to AD conversion absence. Different circuit design solutions can considerably decrease the useful current of IP blocks.

Keywords: low power IP blocks, sampled-data system, SC circuits

В. А. Галперин¹, канд. техн. наук, нач. лаборатории, e-mail: v.galperin@tcen.ru, **H. А. Разживин**², аспирант, e-mail: razzhivin_nik@mail.com ¹ НПК "Технологический центр" ² ИЭМС НИУ "МИЭТ"

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА КОНТРОЛИРУЕМОГО ПЛАЗМЕННОГО СОКРАЩЕНИЯ РАЗМЕРОВ ЗАТВОРА

Приведены результаты исследования процесса тримминга маски, протекающих механизмов реакций и совместимости с процессом травления поликремния. Получены зависимости и оптимальные значения основных технологических параметров стадий, определяющих качество процесса. Проведена оценка влияния параметров и реагентов стадии тримминга на получаемый линейный размер формируемых элементов поликремния, равномерность и минимизацию эффекта микрозагрузки. Сформирован комплекс мер по оптимизации и стабилизации процесса и получению профиля травления с требуемым размером формируемых элементов в условиях опытного производства.

Ключевые слова: реактивно-ионное травление, плазма, профиль травления, тримминг резиста

Введение

Современная фотолитография успешно развивается, постепенно снижая минимальный воспроизводимый размер. Еще недавно переход от 248 до 193 нм рассматривался как революционный прорыв, а теперь по итогам IDF 2013 (Intel Developer Forum) ведущие компании мира выпускают изделия с топологическими размерами 22 нм. В 2014 г. у Intel ожидается 14-нанометровый техпроцесс. Это требует новые системы проектирования, материалы, шаблоны и фоторезистивные маски, а также существенные затраты, обусловленные высокой стоимостью фотолитографического оборудования.

В настоящий момент стратегия преодоления ограничений фотолитографии направлена на процесс тримминга — латерального травления фоторезистивной маски, предваряющий все остальные классические стадии плазменного травления (включая вскрытие нижнего антиотражающего покрытия (АОП — BARC — bottom antireflective coating) и жесткой маски, а также травление затвора). К примеру, в технологии 90 нм использование тримминга позволяет создавать затворы в субсорокананометровом диапазоне при экспонировании на сканерах уровня 193 нм. Подобные методы описаны также как "photoresist ashing", "resist thinning" [1, 2].

Все эти процессы объединяет основное свойство, выраженное в контролируемом уменьшении критичного размера линейных элементов без увеличения сложности литографических требований. Кроме того, важным моментом является корректное интегрирование тримминга в процесс травления, что непосредственно сказывается на качестве, стабильности и воспроизводимости результата, а также на привносимой дефектности.

Методика эксперимента

Фоторезист на пластины 150 мм наносили методом центрифугирования непосредственно на слой легированного поликремния толщиной 420 нм либо 500 нм. Толщина подзатворного диэлектрика составляла 12 нм либо 15 нм. Нанесение фоторезиста и проявление топологического рисунка проводились на трековом оборудовании AIO 600 фирмы AIO MICROSERVICE INC. Изображение экспонировалось на степпере фирмы Canon

модели FPA-2000i1, обеспечивающем минимально воспроизводимый размер в условиях промышленной эксплуатации 600 нм. В тестовых кристаллах, расположенных равномерно по пластине, имелись набор плотно расположенных линий шириной 600 нм и зазором 600 нм и отдельные линии шириной 600 нм. Критичные размеры по сформированной маске измеряли на приборе CD SEM фирмы HITACHI модели S 6200 H, позволяющем оценивать линейные размеры элементов с точностью до 15 нм. На данном приборе образцы измеряли как до проведения процесса тримминга, так и после формирования рисунка в слое поликремния с удалением маски и высадки. Профиль рисунка в слое резиста или в слое поликремния контролировали методом скола и наблюдением на растровом микроскопе фирмы Cambridge Instruments модели Stereoscan 360. Толщины пленок фоторезиста до и после травления измеряли также прибором MPV SP, работающим на принципе измерения толщины прозрачных слоев методом оптической интерферометрии.

Все исследования по оптимизации процесса тримминга в рамках поставленной задачи проводили на установке травления с TCP-источником высокоплотной плазмы низкого давления TCP 9400 (LAM RESEARCH). Данная система позволяет независимо управлять плотностью плазмы и энергией ионов, регулируя значения ВЧ мощности в источнике и на подложку.

Основное внимание в данных исследованиях уделено проблеме травления изолированных и плотно расположенных линий. Достоверно установлено, что изменение так называемого критического размера прямо пропорционально времени процессов тримминга, т. е. скорость латерального травления не зависит от времени. Изолированные линии всегда показывают более высокую скорость травления, чем плотные линии, за исключением процесса с использованием газовой смеси Cl₂/O₂ [4-6]. Также было установлено, что скорость латерального травления резиста в смеси газов HBr/O2 выше, чем в смеси Cl₂/O₂. В то же время различие в скорости травления для изолированных и плотно расположенных линий также выше для смеси газов HBr/O2. Однако при оптимальном соотношении реагентов это различие минимально, и им можно пренебречь.

Различие времени тримминга для изолированных и плотно расположенных линий известно как эффект микрозагрузки. Микрозагрузка обусловлена ограничением доставки реактивных частиц в пределах структур плотно расположенных линий [7]. Поэтому авторы работ по процессу тримминга считают, что любой фактор процесса, усиливающий химический компонент процесса, усиливает эффект микрозагрузки.

Основной вывод, который подчеркивался во всех рассмотренных работах, заключался в том, что для подавления эффекта микрозагрузки необходимо снижать скорость химической реакции, т. е. снижать рабочее давление процесса и увеличивать содержание галогенсодержащего соединения в смеси с кислородом (40...70 об. %). Однако при этом не анализируются такие факты, как образование высадки, подтрав нижележащего слоя, ухудшающие качество травления поликремния.

Поэтому в наших исследованиях [4] основные усилия были направлены на достижение максимальной равномерности и воспроизводимости процесса тримминга с минимальной потерей толщины маски и отсутствием высадки. Мы исследовали переход от размеров 600...800 нм к размерам 300...500 нм без использования антиотражающих слоев.

Исследования по равномерности процесса травления фоторезиста в зависимости от газовой смеси и рабочего давления отражены в таблице. Необходимо отметить, что в нашей работе было выдвинуто предположение о корреляции равномерности скорости вертикального и горизонтального травления фоторезиста, что подтвердилось в ходе дальнейших исследований.

Измерения скорости травления фоторезиста проводили на оптическом спектрофотометре MPV SP по спут-

Характеристики процесса травления фоторезистивной маски для различных газовых смесей и давлений на установке ТСР 9400 при подаче ВЧ мощности 600 Вт в антенну и 15 Вт на подложкодержатель

Вид обработки		Характеристики травления			пения
Реагент	Давле- ние, мТорр	Ско- рость верти- кально- го трав- ления, нм/с	Нерав- но- мер- ность, %	Скорость горизон- тального травле- ния изо- лирован- ных эле- ментов, нм/с	Скорость горизон- тального травле- ния плот- но распо- ложен- ных эле- ментов, нм/с
0 ₂	25	4,8	4,4	2,4	2,2
O ₂	60	3,35	4,45	2,5	2,3
$O_2 + SF_6$	25	5,28	2,1	2,5	2,1
$O_2 + Cl_2$	25	4,83	5,8	2,8	3,0
$O_2 + He$	60	4,33	0,8	3,7	3,8
$O_2 + HBr + He$	60	5,35	3,3	4,25	4,0
$O_2 + Cl_2 + He$	25	5,68	1,8	4,5	4,7
$O_2 + Cl_2 + He$	60	3,55	5,8	2,9	3,0
$O_2 + SF_6 + He$	25	5,35	1,8	4,35	4,15
$O_2 + SF_6 + He$	60	5,5	0,15	5,2	5,1



Рис. 1. Зависимости горизонтальной скорости травления Vи равномерности σ для изолированных и плотно расположенных линий от расхода Q Не в смеси O_2 — Не — SF₆

никам со структурой фоторезист (1300 нм)-Si. Из полученных зависимостей видно, что с точки зрения максимальной равномерности наилучшие результаты показали смеси кислорода с гелием и с добавками галогенов в количестве не более 10 об. % от расхода кислорода, причем использование данных смесей не приводит к образованию высадки и обеспечивает высокую селективность к функциональным слоям, что также немаловажно.

Если же рассматривать влияние давления, то видно, что для одних смесей (O₂ – He – Cl₂/HBr) оптимальным с точки зрения равномерности является 25...30 мТорр, а для других ($O_2 - He, O_2 - He - SF_6$) — 60 мТорр и выше. Мы предполагали, что добавка Не способствует повышению равномерности травления вследствие его высокой теплопроводности и текучести, что и подтвердили полученные результаты. В то же время нами было выдвинуто предположение, что добавка Не повысит характеристики тримминг-процесса, т. е. увеличит отношение латеральной скорости травления фоторезиста к вертикальной и снизит при этом эффект микрозагрузки. Проведенные на установке CD SEM измерения образцов для различных вариантов выполнения тримминг-процесса дали следующие результаты (см. таблицу). Очевидно, что нам удалось получить хорошие характеристики тримминг-процесса в смесях $O_2 - He - Cl_2/HBr$ при давлении 30 мТорр, а в смеси $O_2 - SF_6 - He$ при давлении 60 мТорр. Если сравнивать применение различных газовых смесей по основным параметрам (равномерность, минимальная разность скорости тримминг-процесса для изолированных и плотно расположенных линий и минимальная разность скорости тримминг-процесса и вертикальная скорость травления фоторезиста), то в настоящей работе явно прослеживается преимущество использования газовой смеси O₂ – He – SF₆ с большим содержанием Не. Изменяя расход Не, можно менять отношение скорости тримминг-процесса для изолированных и плотно расположенных линий, а также регулировать разность между скоростью вертикального травления фоторезиста и горизонтального (рис. 1).



Рис. 2. РЭМ-изображения структуры с изолированной линией шириной 400 нм (a) и плотно расположенными линиями шириной 400 нм (δ)

Нам удалось уменьшить ширину плотно расположенных и изолированных линий на 250 нм, уменьшив при этом толщину фоторезиста на 170 нм. РЭМ-изображения структуры с изолированной линией шириной 400 нм и плотно расположенными линиями шириной 400 нм приведены на рис. 2.

Необходимо отметить отсутствие какой-либо высадки как на фоторезисте, так и на поверхности кремния, а также отсутствие подтравов нижележащей структуры вследствие высокой селективности S разработанного процесса (S > 100).

В данной работе также оценивалась совместимость процесса тримминга в газовой смеси O_2 — Не с последующими шагами процесса травления поликремния в Cl_2 — HBr — O_2 -плазме. Измерения линейных размеров элементов показали, что плазменное уменьшение размеров не вносит дополнительный разброс в конечный результат (рис. 3).

Известно, что основным источником дефектности в камере травления является полимерная пленка, покрывающая стенки реактора. Ее состав зависит от элементного состава плазмы, в которой проводится процесс травления. По мере проведения обработки толщина полимера увеличивается, в результате чего возможны его отслаивание и загрязнение поверхности пластины.

Для получения стабильного и воспроизводимого результата травления применяли специальные методы поддержания определенной среды в реакторе. В простейшем случае она заключается в удалении полимерного покрытия стенок реактора (*reactor seasoning strategy*) [8].

На рис. 4 показан результат XPS-анализа образца Al_2O_3 перед обработкой в плазме и после стадии травления кремния в плазме HBr/Cl₂/O₂ и после очистки в плазме SF₆/O₂. Рис. 4, *а* показывает, что эталонный образец состоит в основном из элементов Al и O (здесь они сгруппированы для наглядности) с небольшим углеродным покрытием. Рис. 4, *б* показывает, что после процесса травления кремния тонкий слой SiOCl покрывает стенки реактора, а рис. 4, *в* — что плазма SF₆/O₂ эффективно удаляет слой SiOCl с эталонного образца Al₂O₃.

Однако на рис. 4, *в* также можно видеть, что поверхность Al_2O_3 образца была значительно модифицирована под воздействием плазмы SF_6/O_2 , поскольку объем, исследованный XPS, содержит вклад Al—F связей. Таким образом, на Al_2O_3 поверхности стенок камеры формируется обогащенный фтором слой AlF после их обработки во F-образующей плазме очистки камеры.

Однако мы использовали более совершенную стратегию плазменной очистки и кондиционирования реактора, представленную на рис. 5. Следуя этой схеме, тонкий слой углерода осаждается на внутренние части реактора во время короткой стадии плазменного воздействия перед процессом травления. Этот слой играет двойную роль: он действует как за-

щитный слой, который предотвращает стенки камеры Al_2O_3 от воздействия атомов фтора, и в то же самое время он также обеспечивает прекрасную воспроизводимость среды на стенках реактора для процесса травле-



Рис. 3. Зависимость разницы линейных размеров до и после травления (Δ), а также стандартного отклонения (σ) от времени тримминга (t)





a — перед обработкой в плазме; δ — после травления кремниевой пластины в плазме HBr/Cl₂/O₂; s — после очистки реактора в плазме SF₆/O₂



Рис. 5. Принцип метода покрытия стенок камеры углеродной пленкой:

А — чистая камера Al_2O_3 ; Б — слой, обогащенный углеродом; В — осаждение; 1 — осаждение полимера; 2 — процесс травления; 3 — процесс очистки камеры в смеси SF_6 ; 4 — процесс очистки камеры в смеси O_2

ния. Затем помещаются пластины, и в результате травления на поверхности камеры, покрытой углеродом, осаждается слой SiOCl (в случае травления кремния). После этого процесса слой SiOCl может быть удален стандартным процессом очистки (WAC — wafer auto clean) на основе фтора без повреждения стенок камеры (Al₂O₃), так как они защищены углеродной пленкой. Углеродное покрытие в конечном итоге удаляется со стенок реактора плазмой чистого O₂, который инертен к стенкам камеры из Al₂O₃, и после этого новая углеродная пленка может осаждаться снова перед травлением следующей пластины.

Обсуждение результатов эксперимента и выводы

В ходе работы были исследованы реагенты для проведения тримминга маски и самого процесса травления поликристаллического кремния, механизмы реакций, протекающих во время тримминга. Были получены зависимости основных технологических параметров стадий, определяющих качество разрабатываемого процесса. Оценивалось влияние параметров стадии тримминга фоторезистивной маски на получаемый линейный размер формируемых элементов поликристаллического кремния. Определены оптимальные значения технологических параметров.

Установлено, что стадия тримминга фоторезистивной маски не оказывает отрицательного влияния на стабильность протекания процесса и воспроизводимость получаемых результатов. Введение этой стадии не приводит к увеличению дефектности при правильном построении процесса и проведении регламентных процедур по подготовке камеры травления.

Основываясь на результатах исследований, был сформирован комплекс мер, которые позволили оптимизировать и стабилизировать технологический процесс и обеспечить получение профиля травления с требуемым размером формируемых элементов.

Список литературы

1. Pargon E., Joubert O., Chevolleau T. et al. Mass spectrometry studies of resist trimming processes in HBr/O₂ // J. Vac. Sci. Technol., Jan/Feb 2005. V. B 23, N 1. P. 103–112.

2. Han K. H., Kang J. G., Uhm H. S. et al. Photo-resist ashing by atmospheric pressure glow discharge // Appl. Phys. February 2007. V. 7, Is. 2. P. 211–214.

3. Амиров И. И., Изюмов М. О. Ионно-инициированное травление полимерных пленок в кислородсодержащей плазме высокочастотного индукционного разряда // Химия высоких энергий. 1999. Т. 33, № 2. С. 160—164.

4. Галперин В. А., Мочалов А. И., Лунев Е. В. Процесс контролируемого сокращения размеров затвора // Материалы, процессы, оборудование в нано-, микро- и оптоэлектронике: Сб. науч. тр. М.: МИЭТ, 2008. С. 137—148.

5. Могэб К., Фрейзер Д., Фичтнери У. и др. Технология СБИС. В 2-х кн. / Под ред. С. Зи. М.: Мир, 1986. 453 с.

6. **Briggs D., Seah M. P.** Practical Surace Analysis Auger and X-ray Photoelectron Spectroscopy. 2^{nd} ed. New York: John Wiley & Sons, 1996. 363 p.

7. **Моро У.** Микролитография. Ч. 2 / Пер. с англ. М.: Мир, 1990. 632 с.

8. **Ramosa R., Cungea G., Jouberta O.** et al. Plasma/reactor walls interactions in advanced gate etching processes // Thin Solid Films, 23 April 2007. V. 515, Is. 12. P. 4846–4852.

V. A. Galperin, Head of Laboratory,

Scientific-Manufacturing Complex "Technological Centre" MIET,

N. A. Razzhivin, Graduate Student,

National Research University of Electronic Technology

RESEARCH OF THE PLASMA GATE RESIST TRIMMING PROCESSES

This work presents the results of research of the resist trimming process, mechanisms of reactions occurring during trimming and compatibility with the process of polysilicon etching. The dependences of the main process parameters of steps which define quality of developed process are received. The optimal process parameters are defined. The influence of parameters and reagents for resist trimming step on the resulting control dimension of the polysilicon elements, uniformity and minimize the micro loading effect are defined. There were formed procedures for the process optimization and ensure obtaining the profile with desired size etching element formation for pilot production.

Keywords: dry etch, plasma, etching profile, resist trimming

Материаловедческие И TEXHONOL SCIENCE OF MATERIALS и технологические основы МНСТ AND TECHNOLOGICAL BASICS OF MNST

УДК 621.793.18

В. А. Галперин¹, канд. техн. наук, ст. науч. сотр., **Д. Г. Громов**², д-р техн. наук, проф., гл. науч. сотр., **Е. А. Лебедев**^{2, 3}, аспирант, мл. науч. сотр., e-mail: dr.beefheart@gmail.com, **А. С. Шулятьев**³, аспирант, мл. науч. сотр., **Д. И. Смирнов**^{2, 4}, канд. техн. наук, науч. сотр., **Ю. И. Шиляева**², аспирант, ассистент

¹ Институт нанотехнологий микроэлектроники РАН

² Национальный исследовательский университет "МИЭТ"

³ НПК "Технологический центр" МИЭТ"

⁴ Физический институт им. П. Н. Лебедева РАН

РАЗМЕРНЫЙ ЭФФЕКТ В МНОГОСЛОЙНЫХ ТОНКОПЛЕНОЧНЫХ ТЕРМИТНЫХ МАТЕРИАЛАХ НА ОСНОВЕ КОМПОЗИТА АЛЮМИНИЙ — НИТРИД МЕДИ

Рассмотрен новый тип термитных материалов на основе многослойной структуры алюминий — нитрид меди. Представлены термодинамические расчеты и анализ тепловых эффектов реакции, протекающей в данном композите. Показано, что температура основного теплового эффекта понижается, а скорость распространения реакции повышается с уменьшением периода структуры, при этом форма и положение пика на ДСК-кривой также зависят от давления азота в процессе магнетронного распыления. Проведен структурный анализ. Полученные экспериментальные результаты позволят скорректировать математическую модель.

Ключевые слова: гетерогенные реакции, нанотермитные композиты, многослойные термитные материалы, энергетические материалы

Введение

В последнее десятилетие разработка и создание энергетических нанокомпозитов является актуальной задачей для целого ряда применений, в том числе и в области нанотехнологий. К настоящему моменту уже исследовано и создано несколько типов подобных материалов, включая нанопорошковые смеси [1], наноструктурированные композиты [2], а также многослойные тонкопленочные структуры [3]. Все перечисленные материалы относятся к одному классу, называемому термитами композитным материалам, способным поддерживать в своем объеме самоподдерживающуюся высоко экзотермическую химическую реакцию.

Термодинамический анализ

Традиционно термиты изготавливались в виде смеси двух компонентов: химически более активного материала со значительной энтальпией образования и менее активного материала с малой энтальпией образования. Тепловой эффект (ΔH°) химической реакции равен разности сумм теплот образования (ΔH_f°) продуктов реакции и исходных веществ, умноженных на стехиометрические коэффициенты (v_i) (следствие из закона Гесса):

$$\Delta H^{\circ} = \Sigma (v_i \Delta H^{\circ}_{f, i})_{\text{прод}} - \Sigma (v_i \Delta H^{\circ}_{f, i})_{\text{реагентов}}.$$

Авторами работы был проведен термодинамический анализ в целях выявления химических реакций с максимальным тепловым эффектом. В таблице представлены значения теплоты образования некоторых соединений. Здесь указаны соединения, которые выгодно получать в качестве продуктов реакции и их теплоты образования.

Проведем оценку теплового эффекта реакции образования нитрида алюминия из нитрида меди: $6Al + 3CuN_6 =$ = 6AlN + Cu. Тепловой эффект такой реакции составляет 1,4 или 4,5 кДж/г, что сравнимо с теплотой взрыва динамита, которая равна 6,5 кДж/г.

Подобные высокоэнергетические реакции известны уже более 100 лет и успешно применяются для сварива-

Соединение	Теплота образования <i>ΔН</i> , кДж/моль
Al ₂ O ₃	-1675,7
TiO ₂	-939,7
Ti ₂ O ₃	-1520,9
AIN	-308,2
FeO	-271,9
CuO	-157,3
Ag ₂ O	-31,0
CuN ₆	-468,5

ния железнодорожных рельс и при отливке крупных изделий. Для этих целей термиты изготавливаются в виде порошков. Однако у порошковых смесей есть существенные недостатки. Во-первых, сложно добиться однородности перемешивания компонентов. Во-вторых, каждая гранула активного металла в результате воздействия атмосферы покрывается тонким слоем естественного оксида, что значительно увеличивает температуру "старта" реакции.

Решить эти проблемы позволяет изменение структуры материала. Так, создание многослойных термитов, где тонкие наноразмерные слои компонентов материала чередуются, дает возможность очень точно контролировать количественное соотношение компонентов, а использование методов распыления в вакууме позволяет исключить возможность окисления поверхности металлов. Кроме того, сочетание этих материалов и процессов микроэлектроники позволит использовать многослойные термиты в интегральной технологии, что значительно расширяет круг возможных прикладных решений.

Подготовка образцов

Экспериментальные образцы изготавливали послойным нанесением на подложку пленок методом магнетронного распыления. В качестве материалов-реагентов были выбраны алюминий и нитрид меди. Пленки алюминия напыляли в атмосфере аргона при давлении $7 \cdot 10^{-3}$ Торр и токе на мишени — 2 А. Для нанесения пленок нитрида меди медную мишень распыляли в атмосфере аргона и азота, ток на мишени также составлял 2 А. Предварительно были измерены скорости напыления материалов при разных давлениях азота. Была получена оригинальная зависимость скорости распыления от давления рабочих газов (рис. 1). Наблюдаемый рост скорости нанесения можно связать с вероятным образованием нитрида меди на поверхности мишени при увеличении давления азота в камере, при этом эффективность распыления этого соединения оказывается выше, чем эффективность распыления чистой меди. Дальнейшее снижение скорости нанесения материала можно объяснить более низкой эффективностью распыления материала ионами азота, по сравнению с аргоном, что обусловливается значительной разницей масс элементов.

Для исследования тепловых эффектов методом дифференциальной сканирующей калориметрии (ДСК) многослойные пленки отделяли от подложек, для чего перед нанесением на подложку наносили слой фоторезиста, потом его растворяли в диметилформамиде. Затем плен-



Рис. 1. Зависимость скорости нанесения нитрида меди от давления азота

ки дважды промывали в деионизованной воде, один раз в этиловом спирте и высушивали. Подготовленные таким образом образцы исследовали на дифференциальном сканирующем калориметре DSC 204 F1 Phoenix (Netzsch, Германия). Предварительно взвешенную пробу помещали в алюминиевый тигель и запечатывали с помощью специального пресса. Крышку тигеля перед прессовкой перфорировали, чтобы нагрев происходил в заданной атмосфере. Образцы нагревали в атмосфере аргона в диапазоне температур от комнатной до 500 °C с различными скоростями нагрева.

Результаты

Исследования показали, что изменяя геометрические размеры многослойной структуры можно управлять не только общим тепловым эффектом, но и скоростью выделения теплоты. Скорость выделения теплоты, или скорость реакции, определяется кинетической составляющей, т. е. временем диффузии реагентов к границе раздела фаз. С увеличением толщины слоев увеличивается и диффузионная длина, а значит, уменьшается скорость реакции. Однако при напылении слоев методом магнетронного распыления с планетарным вращением подложек внутри камеры на границах фаз образуется тонкий "перемешанный" слой толщиной несколько нанометров, в котором реакция окисления уже произошла, таким образом, формируется тонкий "барьерный" слой. С уменьшением толщины слоев увеличивается объемная доля перемешанного слоя, при этом скорость распространения и тепловой эффект резко снижаются, что подтверждается литературными данными [4-7] и экспериментальными результатами авторов работы. Наличие перемешанного слоя является недостатком конкретно этого типа установок, где реализовано планетарное вращение подложек. В случае использования установок, где будут реализованы заслонки и возможность напыления слоев в стационарном режиме, можно будет не только решить проблему перемешанного слоя, но и значительно повысить скорость и производительность создания многослойных структур.

Для подтверждения влияния толщины слоев на значение теплового эффекта были проведены методом дифференциально-сканирующей калориметрии измерения двух многослойных структур Al-CuN. Одна из них имела всего три слоя: два слоя алюминия (толщиной 345 нм каждый) и один слой нитрида меди (толщиной 345 нм) между ними. Вторая структура состояла из 23 пар слоев, толщина отдельного слоя составляла 25 нм. При этом общие толщины структур были одинаковы, т. е. количества реагентов в обоих случаях равны. Результат измерения ДСК представлен на рис. 2. Четко видно, что с увеличением толщины структур повышается температура основных эффектов. Для "запуска" реакции во всем объеме материала необходимо определенное количество теплоты. Эта теплота выделяется в результате реакции на границе раздела фаз, а значит, чем больше таких границ, или чем больше слоев в структуре, тем больше точек выделения теплоты, и даже незначительный разогрев материала может привести к старту реакции. Понижение интенсивности и общего теплового эффекта термической реакции в случае структуры с большим числом слоев обусловливается увеличением доли перемешанного материала на границе фаз.

Необходимо отметить, что реакции протекают при относительно низких температурах, в то время как опи-



Рис. 2. ДСК-кривые образцов с разными толщинами структуры: 1 — 3-х слойная структура; 2 — структура из 23 слоев

санные в литературе [5, 6] яркие тепловые эффекты наблюдались при температуре 600...700 °С в структурах Al—CuO, Ti—Al, Ni—Al.

Также были проведены эксперименты по повторному нагреву образцов в целях выявления непрореагировавшего вещества или обратимых химических реакций. Никаких тепловых эффектов в диапазоне температур измерения обнаружено не было, что свидетельствует о завершенности, одностадийности и необратимости реакции.

Было исследовано влияние давления азота в процессе нанесения многослойных структур на положение пиков и тепловой эффект реакции. С одной стороны, с увеличением давления азота наблюдается некоторое смещение самого интенсивного пика в область более высоких температур (рис. 3, а). С другой стороны, четко прослеживается значительный рост теплового эффекта с увеличением давления азота до $(2...4) \cdot 10^{-3}$ Торр и последующее снижение (рис. 3, б). Подобный характер зависимости наблюдался и для скорости нанесения нитрида меди. Объяснить этот эффект можно изменением стехиометрического состава наносимых соединений. Медь образует несколько возможных нитридов: Cu₃N₂, Cu₃N и CuN₆, и, возможно, при давлении $2 \cdot 10^{-3}$ Торр происходит образование соединения, реакция которого с алюминием дает максимальный тепловой эффект, имеющий несколько составных частей: основной вклад дает реакция образования нитрида алюминия, но помимо этого также происходит образование интерметаллидов и тройных соединений, поэтому недостаток меди может привести к понижению общего теплового эффекта реакции.

Для определения основных этапов реакции в многослойной структуре был проведен эксперимент по нагреву образцов до температур тепловых эффектов. Для исследования были выбраны структуры, напыленные при давлении азота 4 · 10⁻³ Торр. Отжиг образцов проводился в вакууме, нагрев осуществляли до выбранной температуры, при которой образцы выдерживали в течение 10 мин, после чего они охлаждались до комнатной температуры естественным способом. Измерение температуры проводили с помощью термопары. Идентификацию образующихся соединений осуществляли методом рентгеновской дифрактометрии. Измерения образцов проводили на многофункциональном рефлектометре X-Ray MiniLab (производство ООО "Институт рентгеновской оптики", г. Москва). Образцы: № 1 — температура отжига 140 °C; № 2 — 365 °C; № 3 — 400 °C; № 4 — без отжига.

На рис. 4, *а* (см. третью сторону обложки) представлены дифрактограммы образцов \mathbb{N} 1 и \mathbb{N} 4. Зафиксирован набор дифракционных пиков от поликристаллических пленок Al и нитрида меди Cu₃N. Аморфная фаза практически отсутствует (не наблюдается нелинейного фона, связанного с рассеянием на аморфной фазе). Сигнал от кремниевой подложки отсутствует, так как в геометрии скользящего падения рентгеновского пучка исследуется только приповерхностная область образца. Образования новых фаз в отожженном при низкой температуре образце \mathbb{N} 1 по сравнению с неотожженным образцом не наблюдается.

На рис. 4, б представлены дифрактограммы образцов № 2 и № 3. Зафиксирован набор дифракционных пиков от поликристаллических фаз Al, AlN, Cu и Cu₃N. По сравнению с образцами № 1 и № 4 число пиков фазы Cu₃N сократилось, и проявился дифракционный сигнал от поликристаллов Cu и AlN. Для образца № 3, ото-жженного при самой высокой температуре, продолжилось фазообразование AlN с выделением Cu.

Образования интерметаллидов и тройных соединений в выбранном диапазоне температур не происходило. Для выявления этих реакций планируется проведение дополнительных экспериментов. Кроме того, будут исследованы также структуры, напыленные при других значениях давления азота.

Полученные экспериментальные результаты планируется использовать при математическом моделировании процесса выделения теплоты в многослойных термитных структурах и они позволят внести корректировки в существующие математические модели [8, 9]. Для того чтобы химическая реакция, протекающая на фронте распространения, была самоподдерживающейся, необходимо выполнение условий энергетического баланса:

$$\frac{dH}{dt} > C\frac{dT}{dt} + \frac{dE_1}{dt},\tag{1}$$



Рис. 3. Зависимость значения теплового эффекта (*a*) и температуры основного пика на ДСК-кривой (*б*) от давления азота в процессе



Рис. 5. Схематичное изображение процесса протекания химической реакции в многослойной структуре:

a — сечение многослойной структуры; δ — увеличение толщины слоя прореагировавшего материала; s — полностью прореагировавшая пленка

где левая часть выражения — это скорость выделения теплоты, и может быть описана как

$$\frac{dH}{dt} = \frac{H_{\rm v}R(T)}{L}\,,\tag{2}$$

где H_v — это удельная объемная теплота образования; L — реакционная длина (рис. 5); R(T) — функция скорости реакции, зависящая от температуры и учитывающая изменение толщины прореагировавшего слоя в каждый момент времени, она может быть записана как функция от температуры в виде

$$R(T) = A\exp[-Q/(kT)],$$
(3)

где A — это константа (для простоты); Q — энергия активации реакции.

Первое выражение в правой части неравенства (1) описывает теплоту, расходуемую на изменение температуры материала в зоне реакции, а C — удельная теплота на единицу объема. Второе выражение учитывает тепловые потери на фронте реакции в пространство, его окружающее.

Заключение

В работе был показан способ изготовления термитной многослойной структуры, исследовано влияние толщины слоев на температуру старта реакции, выявлена зависимость суммарного теплового эффекта от давления азота в процессе напыления нитрида меди, исследованы реакции, происходящие в многослойной структуре. Дальнейшие исследования будут направлены на определение зависимости температуры "запуска" реакции от толщины слоев структуры, планируются эксперименты по исследованию элементного состава для уточнения стехиометрии осаждаемых соединений. Затем будет выполнено моделирование скорости распространения реакции и распространения теплоты с учетом фазовых превращений в многослойных структурах (решение задачи Стефана), что даст возможность прогнозировать тепловой эффект и скорость выделения теплоты. Эти исследования откроют широкие возможности для применения нанотермитов при создании КНИ-структур, 3D-сборки, корпусировании, а также для запуска других реакций.

Список литературы

1. Weismiller M. R., Malchi J. Y., Lee J. G., Yetter R. A., Foley T. J. Effects of fuel and oxidizer particle dimensions on the propagation of aluminum containing thermites // Proc. of the Combustion Institute. 2011. V. 33, Is. 2. P. 1989–1996.

2. Petrantoni M., Rossi C., Conedera V., Bourrier D., Alphonse P., Tenailleau C. J. Synthesis process of nanowired Al/CuO thermite // Journal of Physics and Chemistry of Solids. 2010. V. 71, Is. 2. P. 80–83.

3. Petrantoni M., Rossi C., Salvagnac L., Conedera V., Esteve A., Tenailleau C., Alphonse P., Chabal Y. J. Multilayered Al/CuO thermite formation by reactive magnetron sputtering: Nano versus micro // Journal of Applied Physics. 2010. V. 108. P. 157–167.

4. Gavens A. J., Van Heerden D., Mann A. B. et al. Effect of intermixing on self-propagation exothermic reactions in Al/Ni nanolaminate foils // Journal of Applied Physics. 2010. V. 87, N 3. P. 1255–1263.

5. Picard Y. N., Adams D. P., Palmer J. A., Yalisove S. M. Pulsed laser ignition of reactive multilayer films // Applied Physics Letters. 2006. V. 88. P. 144102–144102–3.

6. **Mann A. B., Gavens A. J., Reiss M. E.** et al. Modeling and characterizing the propagation velocity of exothermic reactions in multilayer foils // Journal of Applied Physics. 1997. V. 82, N 3. P. 1178–1188.

7. Rogachev A. S., Grigoryan A. E., Illarionova E. V. et al. Gasless combustion of Ti–Al bimetallic multilayer nanofoils // Combustion, Explosion, and Shock Waves. 2004. V. 40, N 2. P. 166–171.

8. **Ma E., Thompson C. V., Clevenger L. A., Tu K. N.** Selfpropagating explosive reactions in Al/Ni multilayer thin films // Applied Physics Letters. 1990. V. 57. P. 1262–1264.

9. Michaelsen C., Barmak K., Weihs T. P. Investigating the thermodynamics and kinetics of thin film reactions by differential scanning calorimetry // J. Phys. D: Appl. Phys. 1997. V. 30. P. 3167–3186.

V. A. Galperin, Senior Researcher, Institute of Nanotechnology of Microelectronics RAS,

D. G. Gromov, Prof., Lead Researcher, National Research University of Electronic Technology,

E. A. Lebedev, Graduate Student, Junior Researcher, Scientific-manufacturing complex "Technological centre" MIET,

A. S. Shulyatiev, Graduate Student, Junior Researcher, National Research University of Electronic Technology,

D. I. Smirnov, Ph. D, Research scientist, P. N. Lebedev Physical Institute of the Russian Academy of Sciences,

Yu. I. Shilyaeva, Graduate Student, Assistant, National Research University of Electronic Technology

SIZE EFFECT IN MULTILAYER THIN FILM THERMITE MATERIALS BASED ON ALUMINUM-COPPER NITRIDE COMPOSITE

In this work the thermite material based on multilayer aluminum-copper nitride structure is presented. Thermodynamic calculation and analysis of combustion effects in such composite are performed. It was shown that the main DSC-peak temperature increased and reaction propagation velocity decreased with bilayer thickness, and the peak form and position also depends on nitrogen pressure during the magnetron sputtering. The structure were performed by XRD. Obtained experimental results will allow to correct proposed mathematical model.

Keywords: heterogeneous reactions, nanothermite composite, multilayer thermite materials, energetic materials

УДК 544.723.5, 620.3

Д. А. Богданова¹, e-mail: bogdanovaDA8@gmail.com, **С. В. Булярский**¹, д-р физ.-мат. наук, проф., зав. каф., **А. С. Басаев**², зам. директора

1 Ульяновский государственный университет

² НПК "Технологический центр МИЭТ'

ИЗМЕНЕНИЕ ШИРИНЫ НОМО-LUMO-ШЕЛИ ОДНОСТЕННЫХ УГЛЕРОДНЫХ НАНОТРУБОК ПРИ ХЕМОСОРБЦИИ ВОДОРОДА

Методами квантово-химического компьютерного моделирования исследована регулярная (вдоль оси нанотрубки) водородная хемосорбция на ахиральных одностенных углеродных нанотрубках. Найдена зависимость ширины энергетической НОМО-LUMO-щели нанотрубок от плотности их водородного покрытия для внешней и внутренней хемосорбции.

Ключевые слова: хемосорбция водорода, адсорбция водорода, одностенная углеродная нанотрубка, НОМО-LUMO-щель, деформация нанотрубки, призматические модификации

Введение

Благодаря своим свойствам углеродные нанотрубки (УНТ) обладают широким кругом потенциальных приложений, среди которых одно из самых перспективных создание на основе нанотрубок различных элементов микро- и наноэлектроники [1]. Однако для реализации данных приложений необходимо иметь способ эффективного управления свойствами нанотрубок. Одним из таких способов является хемосорбция различных адатомов на поверхности УНТ. При этом хемосорбция на одностенных углеродных нанотрубках (ОУНТ) может рассматриваться как поверхностное легирование, поскольку она способна менять электронную структуру нанотрубок и образовывать с ними сильные ковалентные (или ионные) связи [2]. Особый практический интерес представляет тот факт, что хемосорбция может быть использована как механизм управления шириной НОМО-LUMО-щели нанотрубок. НОМО-LUMО-щель представляет собой энергетический зазор между высшей занятой молекулярной орбиталью (НОМО) и нижней свободной молекулярной орбиталью (LUMO) [3]. HOMO-LUMOщель является важным параметром наноструктур и может служить аналогом ширины запрещенной зоны для нанотрубок конечной длины. Возможность практической реализации хемосорбции атомарного водорода на УНТ показана в ряде экспериментальных [4, 5] и теоретических [6-9] работ.

1. Модель и метод моделирования и расчетов

В данной работе с помощью полуэмпирического метода АМ1 (модель Остин 1) исследовалась зависимость ширины НОМО-LUMО-щели при регулярной (вдоль оси нанотрубки) хемосорбции водорода на ахиральных ОУНТ конечной длины и различного диаметра. Здесь длина нанотрубки характеризуется числом N элементарных гексагональных циклов вдоль ее оси. При квантово-химическом моделировании водородной хемосорбции на нанотрубке число N выбиралось равным 5. Как показали результаты наших расчетов, эта длина дает стабильные конформации для всех рассматриваемых ОУНТ и является достаточной для того, чтобы краевые водородные атомы не вносили существенного вклада в изменение электронной картины адсорбции.

Известно, что для случая хемосорбции парная адсорбция атомов водорода (на соседних углеродных атомах) предпочтительнее единичной [10, 11]. Логично предположить, что в тех случаях, когда адсорбируются более одной пары атомов водорода на единичную ячейку, наиболее устойчивым при одинаковой степени покрытия является тот его тип (узор покрытия), который соответствует максимальной симметрии системы. Это предположение подтверждается результатами наших квантовохимических расчетов. В дальнейшем здесь будут приводиться данные, полученные для наиболее энергетически выгодных узоров покрытия.

Введем понятие плотности в водородного покрытия как отношение числа адатомов водорода N_H на элементарную ячейку, к числу атомов углерода в элементарной ячейке N_C:

$$\theta = \frac{N_{\rm H}}{N_{\rm C}}.$$

Расчеты проводили при различных плотностях покрытия, вплоть до полного однослойного покрытия.

2. Результаты моделирования и их обсуждение

Результаты моделирования показали, что при хемосорбции нанотрубка подвергается деформации, которая зависит от плотности водородного покрытия. Для примера на рис. 1 представлены фронтальные проекции ОУНТ (8,0), характеризующие изменение поперечного сечения трубки при хемосорбции водорода на ее внешней поверхности при различных плотностях внешнего и внутреннего покрытия. (Здесь и далее приведены данные для наиболее энергетически выгодных конформаций.)

Видно, что в результате регулярной хемосорбции водорода происходит сильная деформация нанотрубок, в ряде случаев приводящая к появлению призматических модификаций. И, как будет показано ниже, значительное искривление "графенового полотна" нанотрубки сильно влияет на ее энергетический спектр.

Нами было установлено, что все рассмотренные здесь ОУНТ могут быть целиком покрыты слоем хемосорбированного водорода снаружи, и для всех плотностей внешнего покрытия существует хотя бы одна устойчивая конформация. Что касается внутренней регулярной хемосорбции, наши расчеты показали, что она энергетически выгодна лишь для нанотрубок, чей индекс хиральности *n* выше определенного критического значения, а именно, n = 3 для ОУНТ типа "кресло" и n = 7 для ОУНТ типа "зигзаг". Это, очевидно, связано с сильным внутренним отталкиванием адатомов водорода в узком внутреннем пространстве нанотрубки.



Рис. 1. Фронтальные проекции нанотрубки (8,0) для различных вариантов внешнего (слева) и внутреннего (справа) водородного покрытия

Результаты наших расчетов показали, что водородная хемосорбция сильно влияет на ширину энергетической *HOMO-LUMO*-щели нанотрубки, что является чрезвычайно полезным фактом для потенциальных практических приложений ОУНТ (в том числе для создания химических сенсоров). На рис. 2 приведены зависимости ширины *HOMO-LUMO*-щели от плотности водородного покрытия для внешней хемосорбции на ОУНТ типа "зигзаг" (слева) и "кресло" (справа) различного диаметра. В таблице представлены данные для внутренней хемосорбции.

Видно, что для нанотрубок типа "кресло" ширина энергетической щели в целом растет с увеличением внешнего водородного покрытия (в силу *sp*²-*sp*³-регибридиза-

ции и "удаления" π-состояний вблизи уровня Ферми). Однако наблюдаются участки, на которых ширина энергетического зазора уменьшается с увеличением водородного покрытия.

Для нанотрубок типа "зигзаг" зависимость ширины *HOMO-LUMO*-щели от плотности водородного покрытия имеет существенно немонотонный, довольно сложный характер. В качестве объяснения можно предположить следующее. Моделирование ОУНТ типа "зигзаг" различной длины и диаметра показало, что ширина их *HOMO-LUMO*-щели сильно зависит от диаметра трубки, и зависимость эта имеет характер затухающих осцилляций. Подобная зависимость существует и для нанотрубок типа "кресло", однако она имеет более монотонный характер. (Результаты на-

шего моделирования показаны на рис. 3). Вместе с тем, как было показано нами выше, хемосорбированный водород сильно деформирует ОУНТ, изменяя ее сечение и средний диаметр. Следовательно, можно предположить, что причина немонотонности графиков на рис. 2 кроется в наложении эффекта "растягивания" трубки при присоединении к ее стенкам атомов водорода.

Для нанотрубок конечной длины (с ограниченным числом частиц) энергетическая *HOMO-LUMO*-щель может рассматриваться как аналог запрещенной зоны. И, следовательно, проводимость одностенной углеродной нанотрубки должна зависеть от ширины ее энергетической щели. Выше было показано, что хемосорбция



Рис. 2. Зависимости ширины энергетической *НОМО-LUMО*-щели от плотности покрытия для внешней хемосорбции на ОУНТ типа "зигзаг" (слева) и "кресло" (справа)



Рис. 3. Зависимость ширины энергетической *HOMO-LUMO*-щели ОУНТ типа "зигзаг" (слева) и "кресло" (справа) от их диаметра (числа *n* гексагонов вдоль периметра трубки, которое совпадает с индексом хиральности трубки); *N* — длина нанотрубки (измеряется числом единичных шестиугольных циклов вдоль оси трубки)

θ	<i>€_{НОМО-LUMO}</i> , эВ	θ	ε _{НОМО-LUMO} , эВ
	(4,4)		(5,5)
0	4,53	0	3,83
0,125	4,06	0,1	3,73
0,250	1,43	0,2	4,02
	(8,0)	0,3	3,95
0	2,61	0,4	1,46
0,125	2,74		(9,0)
0,250	2,78	0	1,44
0,375	1,77	0,111	2,70
	(10,0)	0,222	2,71
0	2,28	0,333	2,43
0,1	2,62	0,444	2,36
0,2	2,87	(11,0)	
0,3	1,44	0	1,15
0,4	2,88	0,091	2,33
0,5	3,24	0,182	1,53
		0,273	1,69
		0,364	2,42
		0,454	3,14

Ширина энергетической НОМО-LUMО-щели (є _{НОМО-}	lumo)
углеродных нанотрубок при различной плотности (ð)
внутреннего волоролного покрытия	

атомарного водорода может как увеличивать, так и уменьшать ширину *HOMO-LUMO*-щели. Считая, что зависимость между шириной энергетической щели и проводимостью имеет экспоненциальный характер [12]

$$G \sim \mathbf{e}^{-\frac{\varepsilon_g}{2kT}},$$

где G — проводимость; ε_g — ширина энергетической щели; k — постоянная Больцмана; T — температура, можно заключить, что даже небольшое изменение щели ведет к значительному изменению проводимости.

Заключение

Таким образом, результаты нашего исследования показали следующее:

- регулярная внешняя водородная хемосорбция на ахиральных ОУНТ конечной длины дает устойчивые конфигурации вплоть до полного покрытия;
- регулярная внутренняя хемосорбция на ОУНТ типа "кресло" конечной длины дает устойчивые конфигурации только для нанотрубок, чей индекс хиральности *n* выше определенного критического значения, а именно, *n* = 3 для ОУНТ типа "кресло" и *n* = 7 для ОУНТ типа "зигзаг";

 регулярная водородная хемосорбция может как увеличивать, так и уменьшать ширину *HOMO-LUMO*щели в зависимости от геометрических параметров трубки, плотности покрытия и расположения адатомов на поверхности трубки; при этом немонотонный характер зависимости ширины *HOMO-LUMO*-щели от плотности водородного покрытия может быть частично объяснен значительной деформацией OУНТ при хемосорбции. Изменяя степень водородного покрытия, можно изменять ширину *HOMO-LUMO*-щели нанотрубки, тем самым управляя ее проводимостью.

Список литературы

1. Булярский С. В. Углеродные нанотрубки: технология, управление свойствами, применение // Ульяновск: Стрежень. 2011. 479 с.

2. Sumanesekera G. U., Adu C. K. W., Fang S., Eklund P. C. Effects of gas adsorption and collisions on electrical transport in single-walled carbon nanotubes // Phys. Rev. Lett. 2000. V. 85 (5). P. 1096.

3. Jean Y., Volatron F. An Introduction to Molecular Orbitals. New York: Oxford University Press, Inc., 1993. 337 p.

4. Liu C., Fan Y. Y., Liu M., Cong H. T., Cheng H. M., Dresselhaus M. S. Hydrogen storage in single-walled carbon nanotubes at room temperature // Science. 1999. V. 286 (5442). P. 1127.

5. Haufler R. E., Conceicao J., Chibante L. P. F., Chai Y., Byrne N. E., Flanagan S., Haley M. M., O'Brien S. C., Pan C., Xiao Z., Billups W. E., Ciufolini M. A., Hauge R. H., Margrave J. L., Wilson L. J., Curl R. F., Smalley R. E. Efficient production of C60 (buckminsterfullerene), C60H36, and the solvated buckide ion // The Journal of Physical Chemistry. 1990. V. 94 (24). P. 8634.

6. Богданова Д. А., Булярский С. В. Моделирование химической адсорбции водорода углеродными нанотрубками // Физика твердого тела. 2013. Т. 55 (3). С. 514.

7. Buchs G., Krasheninnikov A. V., Ruffieux P., Gröning P., Foster A. S., Nieminen R. M., Gröning O. Creation of paired electron states in the gap of semiconducting carbon nanotubes by correlated hydrogen adsorption // New J. Phys. 2007. V. 9 (8). P. 275.

8. **Barnard A. S., Terranova M. L., Rossi M.** Density functional theory of H-induced defects as nucleation sites in hybrid carbon nanomaterials // Chem. Mater. 2005. V. 17 (3). P. 527.

9. Scudder H., Lu G., Kioussis N. Hydrogen-induced unzipping of single-walled carbon nanotubes // Phys. Rev. B. 2003. V. 68 (20). P. 205416.

10. **Park K. A., Kim S. J., Seo K., Lee Y. H.** Adsorption of atomic hydrogen on single-walled carbon nanotubes // J. Phys. Chem. B. 2005. V. 109 (18). P. 8967.

11. **Bauschlicher C. W.** Hydrogen and fluorine binding to the sidewalls of a (10,0) carbon nanotube // J. Chem. Phys. Lett. 2000. V. 322 (3-4). P. 237.

12. Tchernatinsky A., Nagabhirava B., Desai S., Sumanasekera G., Alphenaar B., Jayanthi C. S., Wu S. Y. Adsorption of oxygen molecules on individual carbon single-walled nanotubes // J. Appl. Phys. 2006. V. 99. P. 034306.

D. A. Bogdanova¹, Assistant Professor, **S. V. Bulyarskii**¹, Head of the Chair, **A. S. Basaev**, Deputy Director ¹ Ulyanovsk State University

² Scientific-Manufacturing Complex "Technological Centre" MIET

THE MODIFICATION OF HOMO-LUMO GAP OF SINGLE-WALLED CARBON NANOTUBES UNDER THE HYDROGEN CHEMISORPTION

Regular hydrogen chemisorption on achiral single-walled carbon nanotubes was investigated by means of quantum chemical computer simulations. The dependence of nanotube's HOMO-LUMO gap on value of hydrogen coverage was for external and internal types of coverage.

Keywords: hydrogen chemisorption, hydrogen adsorption, single-walled carbon nanotube, HOMO-LUMO gap, deformation of carbon nanotube, prismatic modifications

О. В. Чуйко, мл. науч. сотр., Е. В. Кузнецов, нач. лаб., М. И. Савельев, мл. науч. сотр., Н. В. Комарова, канд. хим. наук, ст. науч. сотр., М. С. Сироткина, канд. хим. наук, науч. сотр., НПК "Технологический центр", г. Москва e-mail: O.Chuyko@tcen.ru

ТЕХНОЛОГИЯ ФОРМИРОВАНИЯ ИНТЕГРАЛЬНОЙ МИКРОФЛЮИДНОЙ КМОП-СИСТЕМЫ С НАНОПРОВОЛОЧНЫМИ ЧУВСТВИТЕЛЬНЫМИ ЭЛЕМЕНТАМИ

Представлен технологический маршрут изготовления микросистемы, объединяющей в себе интегральное изготовление нанопроволочного ISFET-биосенсора, совмещенного с КМОП-технологией, и микрофлюидной системы на этапе корпусирования и герметизации ИС.

Ключевые слова: ионно-чувствительный полевой транзистор, кремниевые наноструктуры, микрофлюидная система, система "lab on chip", корпусирование, герметизация

Современные тенденции в развитии аналитических систем направлены на улучшение методов химического анализа за счет автоматизации процессов и миниатюризации приборов. Широким направлением являются разработки в области создания микросистем, получивших название "лаборатория на чипе". Данное понятие включает в себя исследования по интеграции стандартных химических протоколов анализа в рамках единой компактной микросистемы, позволяющей после ввода пробы получить результат анализа [1]. "Лаборатория на чипе" в современном представлении состоит из микрофлюидной системы, отвечающей за пробоподготовку образца, и интегрированного сенсорного элемента, отвечающего за детекцию целевых соединений [2]. Использование в качестве чувствительных элементов микро- и наносенсоров, разработанных на основе КМОП-технологий, позволяет в перспективе, с одной стороны, интегрировать системы обработки сигнала и чувствительные элементы в едином кристалле, с другой стороны — проводить параллельный анализ многих веществ за счет создания высокоплотных массивов детектирующих на разные вещества элементов.

В данной работе представлен технологический маршрут изготовления микросистемы, объединяющей в себе интегральное изготовление нанопроволочного ионно-чувствительного полевого транзистора (ISFET) биосенсора [3], совмещенного с КМОП-технологией по проектным нормам 1,2 мкм, и микрофлюидной системы на этапе корпусирования и герметизации интегральной схемы (ИС).

Формирование наноструктур осуществлялось методом "top—down" ("сверху—вниз"). Технология изготовления сенсорных элементов на основе кремниевых наноструктур включает в себя комбинацию двух основных этапов: формирование кремниевых структур с наноразмерами и последовательность операций КМОП-процесса.

Нанопроволочные транзисторные структуры формировались на структурах кремний-на-изоляторе (КНИ) способом утонения полосок рабочего слоя кремния, сформированных методами фотолитографии и селективного травления с вариацией по длине и ширине проволок. Диаметр нанопроволок составил от 20...100 нм (рис. 1).

Параллельно блоку утонения последовательностью стандартных технологических операций формируются *n*-

и *p*-канальные транзисторы с длинной канала от 0,5 до 10 мкм, ширина канала соответствует диаметру проволок. Отдельным блоком технологических операций формировалась область вскрытия проволоки с помощью последовательности операций травления межслойного диэлектрика и скрытого SiO_2 , в результате чего проволочная структура становится "подвешенной" относительно слоя скрытого оксида кремния. Образовавшийся воздушный зазор обеспечивает непосредственное взаимодействие чувствительного элемента с аналитическим раствором (рис. 2).

Технологический маршрут формирования наноструктур вписывается в стандартный КМОП-процесс и позволяет упростить технологический маршрут, увеличивая тем самым воспроизводимость и выход годных структур.



Рис. 1. РЭМ-изображение нанопроволоки



Рис. 2. Условное изображение нанопроволочной структуры

В результате были получены полностью обедненные КНИ-транзисторы. Анализ различных кремниевых ISFET-транзисторов показал, что наибольшей зарядовой чувствительностью обладают полностью обедненные структуры, выполненные на основе КНИ-технологии. Методами численного моделирования показано, что наибольшей чувствительностью обладают нанопроволочные структуры собственного типа проводимости с минимальным возможным диаметром и минимальной толщиной затворного оксида [4]. Затворный диэлектрик был получен методом химического окисления в растворе H₂O₂.

После функционального контроля выходных параметров чувствительных КМОП-элементов на основе наноструктур кремния следует этап корпусирования.

Технологический маршрут сборки подразумевает, что после интегрального изготовления ISFET-транзисторов выполняется резка на отдельные кристаллы, что является отдельной технологической задачей из-за хрупкости наноструктур, находящихся в составе пластины. Для реализации маршрута была предложена механическая сквозная резка пластины алмазным диском с использованием антистатической ленты для защиты наноструктур. Защитная лента позволяет изолировать кристаллы от потока воды и избежать дополнительных загрязнений, а также снизить влияние электростатического заряда. Так как в процессе механической резки накапливается электростатический заряд, для его устранения на заключительной стадии необходимо провести отжиг отдельных кристаллов.

На рис. 3 представлены вольт-амперные характеристики (ВАХ) структур — зависимость тока стока транзистора I_{DS} от напряжения на электроде сравнения V_G при подаче постоянного напряжения на сток-исток транзистора V_{DS} на различных этапах сборки: до резки, после резки, после заключительного отжига структур.

На рис. З видно, что операция отжига отдельных кристаллов позволяет практически нивелировать влияние электростатического заряда.

Корпусирование ИС с наноструктурами включает в себя ряд технологических операций:

- обработка корпусов;
- приклейка кристаллов;
- разварка алюминиевой проволоки;
- интеграция золотого электрода сравнения в процессе сборки;
- обрубка выводной рамки корпуса.

Перечисленные технологические операции отрабатывались в целях совмещения технологии стандартной сборки ИС с формированием микрофлюидной микросистемы с помощью 3D-печати. После корпусирования осуществляется контроль контактов, измерение ВАХ ИС по схеме разварки с помощью устройства контактирования.

Для интеграции процесса формирования микрофлюидной системы в маршрут сборки нанопроволочного ISFET была разработана технология "прямой печати", являющаяся подвидом струйной 3D-печати. Суть технологии заключается в нанесении на поверхность ИС жертвенного слоя, являющегося трехмерным рисунком из вязкоэластичных органических чернил. Структура жертвенного слоя совпадает с геометрией будущей микрофлюидной системы. После формирования трехмерной структуры из жертвенного слоя проводят операцию герметизации ИС с использованием эпоксидной смолы.



Рис. 3. ВАХ *п*-канального ISFET $I_D = f(V_G)$ при $V_{DS} = 0,1$ В: a — линейный; б — логарифмический масштабы; 1 — до резки, 2 — после резки, 3 — после отжига. Длина канала 10 мкм, ширина канала 100 нм



Рис. 4. Этапы формирования МФС на поверхности кристалла:

1 — нанесение жертвенного слоя до монтажа интерфейсов; 2 — монтаж интерфейсов; 3 — герметизация эпоксидной смолой и вытравливание жертвенного слоя



Рис. 5. Микросистема в составе контактирующего устройства (a); изображение кристалла в корпусе после герметизации и формирования микрофлюидной системы (δ)

После отверждения эпоксидного материала жертвенный слой удаляют с помощью химического травления. В результате в теле полимера образуется микрофлюидная система с микроканалами, соединенная двумя выходами для доставки пробы в место локализации чувствительного элемента. Минимальная ширина канала микрофлюидной системы составляет 120 мкм.

Этапы формирования МФС представлены на рис. 4.

Для визуального контроля герметичности и функциональности микрофлюидной системы в целом экспериментальные образцы подключались к прокачивающей помпе и подавался модельный окрашенный раствор. Система считается рабочей, если жидкость свободно проходит через микрофлюидную систему без утечек, а ИС сохраняет свою функциональность. Контроль выходных параметров микросистемы осуществляется с помощью устройства контактирования, позволяющего контролировать ВАХ ИС и реализовывать различные схемотехнические решения (рис. 5).

Разработанная технология поддерживает модульный принцип конструирования, что позволяет создавать нужную конфигурацию микросистемы в зависимости от ее назначения.

В результате проведенных исследований была разработана технология создания микросистем широкого класса для решения самых различных исследовательских задач аналитической химии, биохимии, молекулярной биологии и медицины.

На базе разработанной технологии нами был создан сенсор для обнаружения следовых количеств фосфорорганических токсичных веществ в окружающей среде. При проведении экспериментальных исследований использовалось оборудование ЦКП "Функциональный контроль и диагностика микро- и наносистемной техники" на базе НПК "Технологический Центр".

Список литературы

1. Prakash S. Nanofluidics: systems and applications // Sensors Journal, IEEE. 2008. V. 8, N 5. P. 441-450.

2. Abgrall P., Gue A. M. Lab-on-chip technologies: making a microfluidic network and coupling it into a complete microsystem—a review // Journal of Micromechanics and Microengineering. 2007. V. 17, N 5. P. 15–25.

3. **Кузнецов А. Е., Чуйко О. В.** Исследование кремниевых наноструктур в качестве рН-чувствительных элементов // Нано- и микросистемная техника. 2011. № 12. С. 40–42.

4. **Кузнецов Е. В., Чуйко О. В.** Исследование чувствительности рН-сенсоров на основе кремниевых МДП-нанотранзисторов // Изв. вузов. Сер. "Электроника". 2013. № 3 (101). С. 53—59.

O. V. Chuyko, Junior Researcher, **E. V. Kuznetsov**, Head of Lab., **M. I. Saveliev**, Junior Researcher, **N. V. Komarova**, Senior Researcher, **M. S. Sirotkina**, Researcher assocciate, Scientific-Manufacturing Complex "Technological Center", MIET

TECHNOLOGY INTEGRATED CMOS MICROFLUIDIC SYSTEMS WITH NANOWIRE SENSING ELEMENTS

In this article the technological process fabrication microsystem that combines integral manufacturing nanowire ISFET biosensor combined with CMOS technology and microfluidic system in step assembly and sealing IC is presented.

Keywords: ISFET, pH, silicon nanowire, microfluidic system, system "lab on chip", assembly, sealing

УДК 621.394.618

В. А. Ваньков, инженер-конструктор, Н. С. Землянников, мл. науч. сотр., В. С. Суханов, нач. лаб., НПК "Технологический центр" МИЭТ" e-mail: V. Vankov@tcen.ru

СОВРЕМЕННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ И ПОДХОДЫ СОЗДАНИЯ МИНИАТЮРНЫХ ПРИЕМОПЕРЕДАЮЩИХ МОДУЛЕЙ

Рассмотрен подход к созданию приемопередающих модулей, построенных по современной 2,5D-технологии сборки с использованием кремниевой подложки. Технология "система-в-корпусе" создания микроэлектронных устройств показывает широкие перспективы как альтернатива технологии "система-на-кристалле". Одной из разновидностей технологии является 2,5D-технология сборки, где в качестве несущей применяется кремниевая подложка со сквозными каналами коммутации.

Ключевые слова: приемопередающие модули, система-на-кристалле, 2,5D-технология сборки, целостность сигналов, надежность

Постоянное увеличение потребности в новых и современных устройствах с все меньшими размерами, расширенной функциональностью, улучшенной производительностью и низкой стоимостью заставляет полупроводниковую промышленность разрабатывать и совершенствовать инновационные технологии создания таких микроэлектронных устройств. Двумя основными технологиями, удовлетворяющими заявленным требованиям, являются "система-на-кристалле" (SoC) и "система-в-корпусе" (SiP). В данной работе рассматривается подход к созданию приемопередающих модулей, построенных по современной 2,5D-технологии сборки с использованием кремниевой подложки. Объединение на одной подложке нескольких микро-



Рис. 2. Структурная схема приемопередающего модуля

схем, разнородных по функциональности и технологии изготовления, позволяет удовлетворить потребности различных областей человеческой деятельности, таких как сельское хозяйство, здравоохранение, мониторинг окружающей среды, контроль и управление промышленными объектами и т. д. За счет применения 2,5D-интеграции удается уменьшить габаритные размеры, потребление питания, стоимость устройств, а также расширить полосы пропускания (скорость передачи данных).

Одним из применений приемопередающих модулей (ППМ) может быть беспроводная приемопередача и обработка информации с различных типов датчиков. Конструкция одного из таких ППМ представлена на рис. 1 (см. третью сторону обложки). Структурная схема приведена на рис. 2.

Основными компонентами модуля являются микросхемы приемопередатчика, микроконтроллера или сигнального процессора и схема первичной обработки сигналов (СПОС) с датчика. Микросхемы интегрированы на кремниевой подложке со сквозными каналами коммутации (through silicon vias — TSV). Присоединение микросхем к подложке выполняется по технологии "флипчип" посредством микрошариков припоя или медных выводов с нанесенным на их поверхность припоем. Диаметр микрошариков припоя обычно лежит в диапазоне 20...80 мкм. С обратной стороны кремниевой подложки установлены шарики припоя для последующего монтажа в корпус или печатную плату. Диаметр шариков зависит от шага расположения выводов и обычно лежит в пределах до 500 мкм для данной технологии. В качестве материала припоя обычно используют эвтектические сплавы SnPb или SnAg.

В качестве приемопередатчика может быть выбрано устройство, построенное по архитектуре однократного преобразования частоты, работающее в нелицензируемом диапазоне частот 2,4...2,5 ГГц. Функциональная схема устройства представлена на рис. 3.

В данной схеме приемопередатчик интегрирован с блоками АЦП, ЦАП и последовательным входным/выходным интерфейсом для приема/передачи данных с микроконтроллера или сигнального процессора, в котором происходит требуемая обработка данных. Для

обеспечения расстояния передачи 100...150 м параметры приемопередатчика (полоса пропускания, чувствительность, устойчивость к помехам, мощность передатчика) могут быть адаптированы под стандарт ZigBee или Bluetooth, при этом скорость приема/передачи достигает 250 кбит/с, для передачи на расстояния до 50 м под стандарт WiFi со скоростью до 56 Мбит/с. Наиболее подходящей технологией изготовления является кремний-германиевая БиКМОП-технология с проектными нормами 0,13...0,25 мкм. Кремний-германиевая БиКМОП-технология является ключевой технологией, она позволяет создавать устройства, удовлетворяющие техническим спецификациям современных стандартов передачи данных, например, таких как 4G LTE, основными требованиями которых являются высокие рабочие частоты, низкие коэффициенты шума, высокая чувствительность, широкий динамический диапазон, достаточное усиление передающего тракта и широкие полосы пропускания.

Микросхема цифровой обработки (микроконтроллер/сигнальный процессор) представляет собой устройство на базе RISC-процессоров с частотой работы до 1,2 ГГц (ARM, MIPS и т. д.) и расширенной периферией, включающей АЦП/ЦАП, интерфейсы SPI, USB, UART. Микросхема СПОС представляет собой преобразователь сигналов с различных типов датчиков (резистивного, емкостного, индуктивного, пьезоэлектрического и т. д.). Технологией изготовления этих микросхем является стандартная КМОП-технология с проектными нормами 65...350 нм.

При разработке ППМ важными являются вопросы, связанные с целостностью сигналов, основные из них это полоса пропускания системы, отражения, потери в линиях передач, перекрестные помехи, шумы питания, шумы одновременного переключения, джиттер. Для исследования этих вопросов на стадии разработки применяют программные средства двух-, трехмерного моделирования по методу конечных элементов. Моделируется структура компонентов ППМ, основой которой являются модели линий передачи, представленные на рис. 4 и 5. Примером сред моделирования являются продукты Cadence Spectre, ANSYS HFSS, Microwave Office, Agilent Genesys и многие другие.

По сравнению с технологией ультразвуковой разварки технология "флип-чип" предлагает множество преимуществ, таких как высокая плотность вводов/выводов, более короткие связи, лучший отвод теплоты, самопози-



Рис. 3. Функциональная схема приемопередатчика на диапазон 2,4...2,5 ГГц

цирование в процессе сборки, меньший шаг контактных площадок, меньшие габаритные размеры сборки в целом.

Однако "флип-чип" также имеет весьма существенные недостатки: сложность монтажа/демонтажа; высокая степень риска разрушения контактов, связанная с разностью коэффициентов теплового расширения, между любой парой соединений, для рассматриваемого модуля ППМ между кристаллом микросхемы и кремниевой подложкой, кремниевой подложкой и печатной платой.

Коробление модуля вследствие разности КТР показано на рис. 6. При короблении возникают напряжения сдвига в местах соединений припоем. При достижении пикового значения напряжений сдвига происходит разрушение соединений.



Рис. 4. Модель межсоединений распределительного слоя







Рис. 6. Коробление модуля ППМ вследствие разности КТР

Проблема коробления в настоящий момент решается за счет применения специальных заполнителей между каждой парой соединяемых компонентов системы. Заполнители представляют собой эпоксидные смолы с примесью SiO₂. Кроме функции снижения напряжений сдвига, заполнитель обеспечивает защитные функции от окружающей среды, в частности от воздействия влаги.

Устройства беспроводных приема/передачи и обработки данных с функцией сбора показаний с датчиков за счет применения 2,5D-интеграции могут быть выполнены в виде приемопередающих модулей, основными компонентами которых являются микросхемы приемопередатчика, микроконтроллера или сигнального процессора и схемы первичной обработки сигналов с датчиков различного типа. Основными вопросами при разработке таких приемопередающих модулей являются вопросы целостности сигналов и надежности конструкции в целом. В связи с высокой степенью сложности современных микроэлектронных устройств эти вопросы решаются за счет применения программного обеспечения двух-, трехмерного моделирования по методу конечных элементов.

Список литературы

1. Banijamali B., Ramalingam S., Nagarajan K. and Chaware R. Advanced Reliability Study of TSV Interposers and Interconnects for the 28nm Technology FPGA // Proc. on Electronic Components and Technology Conference. 2011. P. 285–290.

2. **Kuramochi S.** Development of Si Interposer for Advanced Package. 2011. Dai Nippon Printing Co., Ltd.

3. **Zhang Z. and Wong C. P.** Recent Advances in Flip-Chip Underfill: Materials, Process, and Reliability // IEEE transactions on advanced packaging. August 2004. Vol. 27, N 3.

V. A. Vankov, Design Engineer, **N. S. Zemlyannikov**, Junior Researcher, **V. S. Sukhanov**, Head of Lab. Sientific-Manufacturing Complex "Technological Centre" MIET, e-mail: v vankov@tcen ru

STATE-OF-ART TECHNOLOGIES AND APPROACHES FOR TRANSCEIVER MODULES IMPLEMENTATION

The article represents the state-of-art technologies and approaches for transceiver modules creation, in particular 2,5D technology. SiP technology proposes wide capabilities and serves as alternative for SoC. The one of technology direction is 2,5D one, where silicon interposer with TSV (through silicon via) is carrier for dies mounted on it. Due to using of silicon interposer it is possible to integrate heterogeneous dies, to reduce size, power consumption, cost as well as to increase bandwidth of devices.

Keywords: transceiver module, system-on-package, 2,5D technology, signal integrity, reliability

Г. Б. Галиев, д-р физ.-мат. наук, зав. лаб., Е. А. Климов, канд. физ.-мат. наук, ст. науч. сотр.,

Д. В. Лаврухин, науч. сотр., А. Э. Ячменев, науч. сотр., Р. Р. Галиев, науч. сотр.,

Д. С. Пономарев, ст. науч. сотр., e-mail: ponomarev_dmitr@mail.ru, **Р. А. Хабибуллин**, ст. науч. сотр., **Ю. В. Федоров**, зам. дир. по НИОКР, **А. С. Бугаев**, гл. технолог — зам. директора по базовым технологиям, Институт сверхвысокочастотной полупроводниковой электроники РАН (ИСВЧПЭ РАН), г. Москва

РАЗРАБОТКА И ИССЛЕДОВАНИЕ ФОТОПРОВОДЯЩИХ АНТЕНН НА ОСНОВЕ ПОЛУПРОВОДНИКОВ ГРУППЫ АЗВ5, ВЫРАЩЕННЫХ ПРИ ПОНИЖЕННЫХ ТЕМПЕРАТУРАХ ЭПИТАКСИАЛЬНОГО РОСТА

Приведены результаты экспериментальных разработок в области создания перспективного материала для современной терагерцовой ЭКБ — низкотемпературного арсенида галлия, а также фотопроводящих антенн на его основе для генерации и детектирования терагерцового излучения. Разработаны и изготовлены антенны с различной топологией с максимальной частотой генерации ~2 ТГц.

Ключевые слова: наногетероструктура, A3B5, молекулярно-лучевая эпитаксия, генерация и детектирование терагерцового излучения, низкотемпературный арсенид галлия

Введение

Актуальность проблемы освоения терагерцового диапазона частот продиктована необходимостью практического применения терагерцового излучения в разных сферах жизнедеятельности человека: системе безопасности, медицине, материаловедении, радиоастрономии и локации и т. д.

Одним из источников терагерцового излучения служит полевой транзистор с нанометровым затвором, так называемый HEMT (*High Electron Mobility Transistor*). Пример такого HEMT с предельной частотой генерации $f_{\rm max} = 0,63$ ТГц, разработанного в ИСВЧПЭ РАН, приведен в работе [1].

В последние годы GaAs, выращенный при низких температурах, является одним из наиболее перспективных материалов для создания фотопроводящих антенн для генерации и детектирования терагерцового излучения. Полупроводник для создания фотопроводящей антенны должен обеспечивать фотогенерацию ультракоротких токов (длительностью 1 пс или даже короче), что достигается, прежде всего, малым временем жизни неравновесных носителей. Чаще всего в антеннах используется так называемый "низкотемпературный" арсенид галлия — lowtemperature grown (LT)-GaAs, выращенный на подложках при температурах порядка 200...400 °С [2, 3]. Данный материал обладает высокой подвижностью носителей и малыми временами их жизни, которые составляют 0,1 пс для электронов и 0,4 пс для дырок. Спектром излучения такой антенны можно управлять посредством изменения времени жизни, подвижности и концентрации неравновесных носителей, а также топологии антенного элемента.

Экспериментальные данные

Образцы LT-GaAs были выращены методом молекулярно-лучевой эпитаксии (МЛЭ) в ИСВЧПЭ РАН на установках ЦНА-24 и Riber 32P на полуизолирующих подложках GaAs (100), разориентированных на 2° в направлении [0-1-1]. При росте LT-GaAs возникают преципитаты металлического мышьяка размером примерно 4...6 нм в диаметре и плотностью около 10¹⁷ см⁻³.

Перед началом низкотемпературного роста выполняется отжиг подложки в камере роста установки МЛЭ в

потоке мышьяка. Для удаления естественного оксида с поверхности подложки она нагревалась от 20 до 590 °C в течение 20 мин и с выдержкой при этой температуре 20 мин. После этого температура подложки понижалась до 240 °C, и LT-GaAs выращивался при этой температуре. Во время низкотемпературного эпитаксиального роста соотношение потоков мышьяка и галлия $\gamma = P_{As}/P_{Ga}$ равнялась 10, а скорость роста GaAs составляла 14 нм/мин.

Всего было выращено и исследовано две структуры LT-GaAs. Отличие структур заключалось в том, что образец № 1 являлся нелегированной структурой, а образец № 2 содержал δ -легированные кремнием слои, расположенные эквидистантно и разделяющие слой LT-GaAs на четыре части одинаковой толщины. Суммарная толщина слоя LT-GaAs для обоих образцов составила 2,4 мкм. Температура кремниевой ячейки равнялась 1060 °С, а время легированного кремнием слоя составила 2,3 · 10¹² см⁻². В образце № 2 плоскость нанесения δ -Si слоя может способствовать скоплению избыточного мышьяка в виде преципитатов в данной плоскости. Схематическое расположение эпитаксиальных слоев для обеих структур приведено на рис. 1, *а* и *б*.

Для формирования антенн на выращенных структурах был разработан и изготовлен фотошаблон, содержащий несколько антенн различных типов с контактными площадками. Размер контактных площадок (3 × 3 мм) позволял припаивать проводники с помощью индия паяльником, нагретым чуть выше температуры плавления







Рис. 2. Изготовленные фотопроводящие антенны с различной топологией

индия без использования флюсов. На рис. 2 приведена разработанная топология для фотошаблона антенны для генерации терагерцового излучения. Расстояние между контактными площадками составляет 4 мм, ширина полоски — 5 мкм. При такой топологии вектор поляризации расположен в плоскости пластины. Для формирования рисунка использовались двухслойная система фоторезистов LOR5A/S1813 и установка контактной ультрафиолетовой фотолитографии SUSS MJB4. Проявление проэкспонированного фоторезиста проводилось в проявителе на основе тетраметил аммония гидроксида (TMAH), не содержащего ионов металлов. Для удаления следов фоторезиста в проявленных окнах использовалась обработка в кислородной плазме. Непосредственно перед термическим напылением металлов проводилось удаление оксидов арсе-



Рис. 3. Расположение эпитаксиальных слоев структур LT-GaAs для фотопроводящих антенн: слой LT-GaAs (кривая *I*); слои LT-GaAs с промежуточными δ-легированными кремнием слоями кремния (кривая 2) нида галлия в водном растворе соляной кислоты. После напыления системы металлов Ti/Au (50 нм/300 нм) проводилась двухстадийная операция "взрыва" (*lift-off*), промывка пластины в деионизованной воде и сушка на центрифуте. На рис. 2 приведены примеры изготовленных фотопроводящих антенн с различной топологией.

Измерения изготовленных антенн проводились в МГУ им. М. В. Ломоносова на терагерцовом спектрометре, в котором стандартный источник терагерцового излучения заменен на разра-

ботанные антенны. Измеренные спектры терагерцового импульса приведены на рис. 3. Максимальная частота генерации составила 2 ТГц.

Выводы

В работе приведены результаты экспериментальных разработок ИСВЧПЭ РАН в области создания перспективного материала — низкотемпературного арсенида галлия, а также фотопроводящих антенн на его основе для генерации и детектирования терагерцового излучения в диапазоне 1...5 ТГц. Методом молекулярно-лучевой эпитаксии выращены два типа структур LT-GaAs: нелегированная и с четырьмя δ -слоями. Разработаны и изготовлены антенны с различной топологией и размером контактных площадок. Максимальная частота генерации в таких антеннах составила ~2 ТГц.

Авторы выражают благодарность И. А. Ожередову и А. П. Шкуринову за предоставленные измерения TDS.

Работа выполнена при частичной поддержке гранта РФФИ 14-07-31108/14 от 19.02.2014 г.

Список литературы

1. Лаврухин Д. В., Ячменев А. Э., Галиев Р. Р., Хабибуллин Р. А., Пономарев Д. С., Федоров Ю. В., Мальцев П. П. МНЕМТ с предельной частотой усиления по мощности $f_{\rm max} = 0.63$ ТГц на основе наногетероструктуры In_{0.42}Al_{0.58}As/In_{0.42}Ga_{0.58}As/In_{0.42}Al_{0.58}As/GaAs // Физика и техника полупроводников. 2014. Т. 48. Вып. 1. С. 73.

2. Geizutis A., Krotkus A., Bertulis K., Molis G., Adomavicius R., Urbanowicz A., Balakauskas S., Valaika S. Terahertz radiation emitters and detectors // Optical Materials. 2008. V. 30. P. 786.

3. Prieto E. P., Vizcara S. B., Somintac A. S., Salvador A. A., Estacio E. S., Que C. T., Yamamoto K., Tani M. Terahertz emission enhancement in low-temperature-grown GaAs with an n-GaAs buffer in reflection and transmission excitation geometries // JOSA B. 2014. V. 31, Is. 2. P. 291.

G. B. Galiev, Head of Laboratory, E. A. Klimov, Senior Researcher, D. V. Lavrukhin, Researcher Associate,

- A. E. Yachmenev, Researcher Associate, R. R. Galiev, Researcher Associate, D. S. Ponomarev, Senior Researcher,
- R. A. Khabibullin, Senior Researcher, Yu. V. Fedorov, Deputy Director on NIOKR,

A. S. Bugaev, Deputy Director on basic technologies,

Institute Ultra High Frequency Semiconductor electronics, Russian Academy of Sciences

FABRICATION AND INVESTIGATION OF THE PHOTOCONDUCTIVE ANTENNAS BASED ON A3B5 SEMICONDUCTORS GROWN BY MBE WITH THE LOW-TEMPERATURE REGIME

Results of the experimental developments in the field of low-temperature GaAs and photoconductive antennas for generation and detection of THz waves based on it have been considered. Such antennas with the different topology are fabricated and show a cut-off generation frequency up to 2 THz.

Keywords: nanoheterostrucure, A3B5 semiconductors, molecular-beam epitaxy, generation and detection of THz waves, low-temperature grown GaAs

Элементы MHCT Micro-AND NANOSYSTEM TECHNIQUE ELEMENTS

УДК 621.316.543.1

П. П. Мальцев, д-р техн. наук, проф., директор, М. В. Майтама, инж.-исследователь, А. Ю. Павлов, канд. техн. наук, зав. лаб., Н. В. Щаврук, науч. сотр., Институт сверхвысокочастотной полупроводниковой электроники РАН (ИСВЧПЭ РАН) e-mail: kolq_@mail.ru

РАСЧЕТ И ИЗГОТОВЛЕНИЕ УЗКОПОЛОСНОГО СВЧ МИКРОЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКОГО ПЕРЕКЛЮЧАТЕЛЯ ДЛЯ ЧАСТОТНОГО ДИАПАЗОНА 10...12 ГГЦ НА ПОДЛОЖКАХ АРСЕНИДА ГАЛЛИЯ

Рассмотрены вопросы проектирования и изготовления дискретных электростатических СВЧ переключателей на основе микроэлектромеханических систем (МЭМС) на пластинах арсенида галлия и оценки возможности интегрирования их в общую схему с монолитными интегральными схемами (МИС) приемо-передающих устройств, изготовленных в едином производственном цикле.

Ключевые слова: микроэлектромеханические системы (МЭМС), СВЧ переключатель, расчет МЭМС-переключателя, арсенид галлия

Введение

Постоянно возрастающие требования снижения размеров и массы сверхвысокочастотных (СВЧ) устройств, расширения их динамического диапазона, уменьшения потребляемой мощности и стоимости, наращивания их интеграции и функциональных возможностей при росте рабочих частот требуют от разработчиков максимального использования опыта и технологических приемов создания ИС на GaAs, GaN и кремнии. Одной из проблем СВЧ устройств является создание переключателей сигналов, удовлетворяющих современным требованиям.

В настоящее время различают СВЧ переключатели электромеханические и твердотельные (на дискретных полупроводниковых приборах).

Задачей настоящей работы является разработка и создание СВЧ переключателей для частотного диапазона 10...12 ГГц, объединяющих лучшие характеристики обоих вышеупомянутых типов — возможность коммутации высоких мощностей, присущих электромеханическим переключателям, и высокое быстродействие при низком собственном энергопотреблении в сочетании с малыми габаритными размерами, присущими твердотельным переключателям на дискретных электронных приборах.

Основные типы СВЧ переключателей

В настоящее время широко применяют СВЧ переключатели трех типов: электромеханические, твердотельные (полупроводниковые) и МЭМС-переключатели. Электромеханические переключатели превосходят все остальные по коммутируемой мощности — до нескольких киловатт на частоте 1 ГГц [1], имеют собственные потери 0,1...0,3 дБ и развязку СВЧ сигнала 60...80 дБ. Но при этом электромеханические коммутаторы имеют высокую потребляемую мощность — до 10 Вт (для мощных переключателей), большое время переключения — 10...20 мс, относительно низкий срок службы — около 1 млн циклов [1, 2].

МЭМС-переключатели имеют преимущества перед твердотельными СВЧ переключателями [3]: высокое соотношение потерь в разомкнутом и замкнутом состоянии, практически нулевое потребление мощности в замкнутом состоянии. Но при этом они имеют и недостатки: низкое быстродействие по сравнению с полупроводниковыми переключателями, необходимость для управления формировать импульс переключающего напряжения от 20 до 80 В. Следует отметить, что срок службы МЭМС-переключателей составляет порядка 10¹⁰ циклов [4] с возможностью коммутации СВЧ сигнала высокой мощности (до 10 Вт) [5].

Проектирование МЭМС-переключателя

Для интеграции в МИС приемно-передающего устройства на частотный диапазон 10...12 ГГц МЭМС-переключатель должен иметь следующие характеристики: напряжение срабатывания менее 15 В; вносимые потери менее 0,2 дБ; коэффициент изоляции более 30 дБ. Было решено остановиться на электростатическом переключателе шунтирующего типа с емкостным контактом. Это связано, в первую очередь, с тем, что данный тип переключателя может быть изготовлен с применением методов поверхностной технологии, позволяющей использовать те же материалы и базовые технологии, что и при изготовлении МИС на основе арсенида галлия. К тому же данный тип переключателя позволяет использовать крепление мембраны с малым коэффициентом упругости, что дает возможность изготавливать переключатели с малым напряжением срабатывания (до 6 В) [6].



Рис. 1. Геометрическая и эквивалентная схема шунтирующего электростатического МЭМС-переключателя



Рис. 2. Размеры крепления мембраны и топология МЭМС-переключателя

Электростатический МЭМС-переключатель шунтирующего типа с емкостным контактом представляет собой металлическую мембрану, расположенную над СВЧ электродом и закрепленную на заземленном электроде (рис. 1). При подаче управляющего напряжения на СВЧ электрод мембрана за счет сил электростатического притяжения опускается на диэлектрик, нанесенный на СВЧ электрод. Емкость между мембраной и СВЧ электродом возрастает, переключая таким образом СВЧ сигнал на заземленный электрод.

Как видно из эквивалентной схемы, крепление мем-

браны оказывает влияние на СВЧ параметры переключателя, так как обладает некоторой индуктивностью и сопротивлением. Тогда импеданс переключателя можно представить как

$$Z = \begin{cases} \frac{1}{i\omega C} \text{ для } f \ll f_0 \\ R_s \text{ для } f = f_0 \\ i\omega L \text{ для } f \gg f_0, \end{cases}$$
(1)

где f_0 — резонансная частота, равная $1/2\pi \sqrt{LC}$; L — индуктивность крепления; C — емкость между металлической мембраной и СВЧ электродом.

Следовательно, подбирая индуктивность крепления мембраны и емкость между СВЧ электродом и мембраной в сработавшем состоянии СВЧ МЭМС-переключателя, можно добиться значительного увеличения коэффициента изоляции.

Наиболее подходящим креплением мембраны, обладающей наибольшей индуктивностью и наименьшей жесткостью, является меандр, широко применяемый в СВЧ МЭМС-переключателях с наименьшим напряжением срабатывания [7].

Для оценки индуктивности крепления мембраны вычисляли общую индуктивность крепления как индуктивность полосковой линии, из нее вычитали взаимную индукцию параллельных сегментов меандра. Для уменьшения геометрических размеров переключателя длина крепления была выбрана равной ширине мембраны, после чего эквивалентную схему рассчитывали с помощью программы AWR Design Environment. После подбора параметров эквивалентной схемы для резонансной частоты 11 ГГц, было проведено электрофизическое моделирование топологии переключателя в программе ASD (Advanced Design Systems). Получившаяся топология представлена на рис. 2. При этом мембрана имела следующие параметры: действующий размер мембраны 100 × 100 мкм; воздушный зазор 2 мкм; толщина диэлектрика между мембраной и СВЧ электродом 120 нм. Мембрана состояла из слоя Ті/Аи толщиной 50 и 500 нм соответственно и гальванического слоя золота толщиной 1,5 мкм.

Результаты электрофизического моделирования переключателя во включенном и выключенном состояниях представлены на рис. 3, из которых видно, что собственные потери переключателя составили менее 0,2 дБ, а развязка СВЧ сигнала более 30 дБ для диапазона 10...12 ГГц.

По формуле, приведенной в работе D. Peroulis [5], был рассчитан коэффициент упругости крепления мембраны и найдено напряжение срабатывания переключателя, которое составило 11,2 В.

Как показывают данные расчетов напряжения срабатывания и программы ADS, проектируемый переключатель соответствует заданным параметрам.

Изготовление МЭМС-переключателя

МЭМС-переключатель изготавливался с применением методов базовой технологии изготовления ИС на основе дискретных полупроводниковых приборов на базе гетероструктуры AlGaAs/InGaAs/GaAs. Основные этапы изготовления МЭМС-переключателя и ИС МШУ представлены в таблице.



Рис. 3. Прохождение СВЧ сигнала через МЭМС-переключатель во включенном (*a*) и выключенном (*б*) состоянии

Сравнение технологических маршрутов изготовления малошумящего усилителя (МШУ) на основе гетероструктур AlGaAs/InGaAs/GaAs и изготовления МЭМС-переключателя

Последовательность технологических операций при изготовлении МЭМС-переключателя	Последовательность технологических операций при изготовлении МШУ на гетероструктурах AlGaAs/InGaAs/GaAs
Подготовка поверхности пластины	Приборная изоляция
Формирование нижнего элект- рода, контактных площадок и нижних обкладок развязываю- щих конденсаторов	Омические контакты
_	Формирование электронно- лучевого затвора длиной < 0,15 мкм
Формирование опор моста	—
Формирование пассивации СВЧ линии и нижних электродов	Пассивация активных поверхностей
Формирование верхних обкла- док развязывающих конденсато- ров и утолщение опор моста	Формирование первого уровня электрических межсоединений
Формирование жертвенного слоя, гальваническое утолще- ние элементов конструкции МЭМС-устройств	Металлизация контактных площадок с "воздушными" мостами

Отличительной особенностью изготовления МЭМСпереключателя является наличие операции удаления жертвенного слоя. Это обусловлено тем, что при удалении фоторезиста жидкостным растворителем и последующей сушке пластины капиллярная сила притягивает мембрану к управляющему электроду, и мембрана прилипает к нему за счет сил водородных связей (сил Вандер-Ваальса). Во избежание данного эффекта применяют сушку при критической температуре в CO₂ и метод сублимационной сушки или выжигание жертвенного слоя в кислородной плазме.

Несмотря на то что сушка при критической температуре в CO_2 прекрасно зарекомендовала себя и широко применяется при изготовлении приборов по МЭМСтехнологии, данная операция не используется при изготовлении МИС на основе арсенида галлия. Поэтому в данной работе при изготовлении МЭМС-переключателей жертвенный слой удаляли при сублимационной сушке с использованием циклогексана [3]. Циклогексан имеет такие важные особенности, как высокая температура плавления — 6,6 °С, высокое давление насыщенных паров — 40 Торр. При температуре плавления и при замерзании он остается пластичным, снижая риск повреждения мембран. "Воздушные" мосты в схемах малошумящего усилителя не подвержены капиллярному эффекту ввиду высокой жесткости конструкции.

Тем самым показана возможность изготовления в едином технологическом цикле CBЧ переключателей и полупроводниковых приборов на основе гетероструктур AlGaAs/InGaAs/GaAs, что свидетельствует о возможности изготовления приемо-передающего модуля класса "система-на-кристалле".

Исследование характеристик МЭМС-переключателя

Для оценки напряжения срабатывания и измерения емкости полученных переключателей проводили измерения на CLR-метре HP 4284A вольт-фарадных характеристик (рис. 4) СВЧ МЭМС-переключателей, изготовленных по топологии, представленной на рис. 2, и по технологии, описанной в таблице. Вносимые потери и изоляцию СВЧ сигнала непосредственно измеряли на векторном анализаторе PNA E8361A.

Видно, что напряжение срабатывания переключателей не превышает 17 В, емкость сработавшей мембраны оказалась меньше расчетной емкости и составила 3,08 пФ против 4,5 пФ соответственно. Уменьшение емкости сработавшего переключателя также сказалось на частотных характеристиках переключателя, как видно из рис. 5 (см. четвертую сторону обложки), резонансная частота сместилась с 11 ГГц в область 12,9...13,9 ГГц. Изоляция СВЧ сигнала для резонансных частот равна 45...50 дБ, собственные потери переключателя составили 0,49 дБ.

Для исключения другой систематической ошибки, допущенной при моделировании топологии СВЧ МЭМСпереключателя, был выполнен расчет СВЧ параметров принципиальной схемы МЭМС-переключателя при измеренных значениях емкости мембраны. Как видно из рис. 6, результат расчета СВЧ характеристик эквивалентной схемы достаточно хорошо согласуется с полученным результатом.

Уменьшение емкости МЭМС-переключателя объясняется шероховатостью поверхностей диэлектрика и металлической мембраны, препятствующей плотному прилеганию металлической мембраны к диэлектрическому слою. Значение "воздушного" зазора, оцененное









по уменьшению емкости сработавшей мембраны переключателя, составило в среднем 11,4 нм.

Заключение

Предложенный расчет СВЧ переключателя хорошо согласуется с результатами измерения изготовленных макетов СВЧ МЭМС-переключателей для частотного диапазона 10...12 ГГц, методика расчета и используемое программное обеспечение позволяет корректно оценивать характеристики переключателей. Резонансный LC-контур позволил спроектировать электростатический СВЧ МЭМС-переключатель с емкостным типом контакта и высоким отношением изоляции сигнала к собственным потерям переключателя. Коэффициент изоляции для резонансных частот составил 45...50 дБ, собственные потери переключателя равны 0,49 дБ. Рассмотренный маршрут формирования дискретного МЭМС-переключателя позволяет его в дальнейшем интегрировать в МИС на основе гетероструктур AlGaAs/InGaAs/GaAs, так как при изготовлении макетов переключателей были использованы оборудование и материалы, задействованные при создании МИС на подложках GaAs.

Список литературы

1. High Power Coaxial Switches [Электронный ресурс]. URL: http://www.rlcelectronics.com/products/9-switches/41-high_ power_coaxial_spdt,_srp-2_series.html. Режим доступа: свободный (дата обращения 05.04.2014).

2. Белов Л. Переключатели сверхвысокочастотных сигналов // Электроника: Наука, Технология, Бизнес. 2006. № 1. С. 20–25.

3. Rebeiz G. M. RF MEMS: Theory, Design, and Technology. John Wiley & Sons, Inc., 2003

4. Majumder S., Lampen J., Morrison R. et al. A Packaged, High-Lifetime Ohmic MEMS RF Switch // Microwave Symposium Digest, 2003. IEEE MTT-S International. 2003. V. 3. P. 1935–1938.

5. RF MEMS: Switches and Products Catalog 2013-2014. C. 7—9 [Электронный ресурс]. URL: http://www.radantmems. com/radantmems.data/Library/MEMS%20BROCHURE%20% 202014.pdf. Режим доступа: свободный (дата обращения 05.04.2014)

6. Wang Y., Li Z., McCormick D. T., Tien N. C. Low-voltage lateral-contact microrelays for RF applications // Proc. of 15th IEEE International Conference on Micro-Electro-Mechanical

Systems. January 2002. P. 645–648. 7. Peroulis D., Pacheco S. P., Sarabandi K. et al. Electromechanical considerations in developing low-voltage RF MEMS switches // IEEE Trans. Microwave Theory Tech. Jan. 2003. V. 51. P. 259–270.

P. P. Maltsev, Prof., director, M. V. Maytama, Research Engineer, A. Y. Pavlov, Laboratory Chief, N. V. Shchavruk, Research Associate,

Institut of Ultra Hight Frequency Semiconductor Electronics Russian Academy of Science (IUHFSE RAS)

CALCULATE AND MANUFACTURING NARROWBAND RF MICROELECTROMECHANICAL SYSTEMS (MEMS) SWITCHES FOR FREQUENCY 10—12 GHz ON GALLIUM ARSENIDE SUBSTRATE

This paper presents designing and manufacturing of discrete Microelectromechanical Systems (MEMS) RF switches on GaAs substrates, and evaluation of possibility for intergration them into combined design with Monolithic Microwave Integrated Circuit (MMIC) transceivers utilizing GaAs MMIC process.

Keywords: microelectromechanical systems (MEMS), RF switch, design MEMS switch, gallium arsenide

УДК 544.643.076.2:539.2

В. А. Галперин¹, канд. техн. наук, ст. науч. сотр., Д. Г. Громов², д-р техн. наук, проф., гл. науч. сотр., **Е. П. Кицюк**², аспирант, мл. науч. сотр., e-mail: Kitsyuk.É@gmail.com,

А. М. Маркеев³, канд. физ.-мат. наук, науч. сотр., Е. А. Лебедев², аспирант, мл. науч. сотр., А. Г. Черникова³, аспирант, инженер, С. В. Дубков⁴, аспирант, инженер,

¹ Учреждение РАН Институт нанотехнологий микроэлектроники

² НПК "Технологический центр" МИЭТ"

³ Московский физико-технический институт (государственный университет)

⁴ Национальный исследовательский университет "МИЭТ"

СУПЕРКОНДЕНСАТОР НА ОСНОВЕ УНТ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ПСЕВДОЕМКОСТИ ТОНКИХ СЛОЕВ ОКСИДОВ МЕТАЛЛОВ

Исследуется роль псевдоемкости в повышении суммарной емкости суперконденсаторов. Продемонстрировано многократное увеличение емкости суперконденсаторов с электродами на основе углеродных нанотрубок, покрытых тонким слоем Al₂O₃ и TiO₂, наносимых методом атомно-слоевого осаждения.

Ключевые слова: суперконденсатор, двойной электрический слой, псевдоемкость, углеродные нанотрубки, атомнослоевое осаждение

Введение

Одним из новых и динамично развивающихся устройств накопления и хранения энергии является суперконденсатор, который обладает более высокой удельной емкостью в сравнении с конденсаторами и большей удельной мощностью, чем аккумуляторы. Кроме того, суперконденсатор обладает продолжительным временем жизни, т. е. стойкостью к числу циклов заряда-разряда, которых он может выдерживать до 10⁶ практически без снижения емкости.

Накопление энергии в суперконденсаторах осуществляется по двум механизмам:

 за счет емкости двойного электрического слоя [1, 2], который образуется на границе раздела электрод электролит. Емкость в этом случае определяется как

$$C = \frac{\varepsilon \varepsilon_0 A}{d},\tag{1}$$

где ε — относительная проницаемость среды двойного слоя; ε_0 — проницаемость вакуума; A — удельная площадь электрода; d — эффективная толщина двойного электрического слоя;

 за счет псевдоемкости, обусловленной протеканием обратимых химических реакций между электродом и электролитом [3—5]. В этом случае аккумуляция электронов имеет фарадеевский характер, когда электроны образуются в результате окислительной реакции и переносятся через границу раздела электрод—электролит. Теоретическая псевдоемкость оксида металла может быть рассчитана по формуле

$$C = \frac{nF}{MV},\tag{2}$$

где *n* — число электронов, высвобождающихся в результате окислительной реакции; *F* — константа Фарадея; *M* — молярная масса оксида металла; *V* — окно рабочих напряжений.

Стоит отметить, что оба механизма могут одновременно сочетаться в едином устройстве. При этом такие гибридные суперконденсаторы позволяют достигать более высоких плотностей емкости и мощности, сохраняя отличную стабильность характеристик при циклировании.

В настоящее время электроды большинства коммерческих суперконденсаторов изготавливаются из всевозможных модификаций углерода (активированный уголь, углеродные нанотрубки и т. д.), которые является доступными и недорогими материалами и обладают отличными антикоррозийными свойствами. Суперконденсаторы на основе углерода обладают циклической стабильностью и продолжительным временем жизни, так как ни на поверхности, ни в объеме материала электрода в процессе заряда—разряда не протекают химические реакции, а накопление и хранение заряда осуществляется за счет двойного электрического слоя. Однако емкость таких устройств ограничена удельной площадью поверхности электрода (до 150 Φ/r для активированного угля [6, 7]).

Одним из наиболее исследуемых углеродных материалов являются углеродные нанотрубки (УНТ) [8]. Сообщается, что "чистые" УНТ обладают как емкостью двойного электрического слоя, так и псевдоемкостью. Самая высокая удельная емкость УНТ составляет 100 Φ/r [9], при этом УНТ имеют бо́льшую электронную проводимость по сравнению с электродами из активированного угля.

Перспективным направлением увеличения удельной емкости и плотности энергии суперконденсаторов является модификация их электродов оксидами переходных металлов. В число исследуемых металлов входят RuO_2 , MnO_2 , NiO, Co_3O_4 , SnO_2 , ZnO, TiO_2 , V_2O_5 , CuO, Fe_2O_3 , WO_3 , и т. д. [10—14]. В отличие от литий-ионных аккумуляторов, где ионы глубоко внедряются внутрь решетки материала электрода, псевдоемкость появляется при слабом взаимодействии поверхностных ионов. Поверхностные функциональные группы, дефекты на границе

Псевдоемкость и проводимость некоторых оксидов металлов

Таблина 1

Оксид	Электролит	Теоретическая емкость, Ф/г	Проводимость, С/см
$\begin{array}{c} MnO_2\\NiO\\Co_3O_4\\V_2O_5\\RuO_2,\\xH_2O\end{array}$	Na ₂ SO ₄ KOH, NaOH KOH, NaOH NaCl, Na ₂ SO ₄ H ₂ SO ₄ , Na ₂ SO ₄	1380 (0,9 B) [15] 2584 (0,5 B) [16] 3560 (0,45 B) [17] 2120 (1 B) 1200-2200 (1,23 B) [18]	10 ⁻⁵ до 10 ⁻⁶ 0,01-0,32 10 ⁻⁴ до 10 ⁻² 10 ⁻⁴ до 10 ⁻² 10 ³ для поликрис- таллического, 1 для аморфного

зерен могут стать центрами окисления для протекания реакции накопления. В табл. 1 перечислены теоретические псевдоемкости самых распространенных оксидов металлов. Однако оксиды металлов не могут быть использованы отдельно как электроды для суперконденсаторов по следующим причинам:

- электропроводность большинства оксидов металлов крайне низка. Высокое сопротивление оксидов металлов приводит к значительному падению напряжения на внутреннем сопротивлении суперконденсатора при высоких плотностях тока;
- напряжения, которые возникают в чистых оксидах металлов в процессе заряда—разряда, приводят к растрескиванию электрода, что ограничивает время жизни конечного устройства;
- в оксидах металлов достаточно сложно контролировать распределение пор по размерам, а значит, и контролировать площадь поверхности.

По этим причинам особое внимание исследователей направлено на композитные электроды, содержащие как углерод, так и оксиды металлов, что позволяет снизить негативное влияние недостатков и усилить положительные моменты от обоих механизмов. Высокая электронная проводимость углеродных структур повышает стабильность характеристик при высоких токах. Основной вклад в емкость суперконденсатора в этом случае вносит псевдоемкость тонкого слоя оксида металла на поверхности УНТ.

Методика эксперимента

Для проведения исследований был изготовлен ряд экспериментальных образцов электродов на основе композита УНТ/оксид металла. В качестве материала подложки, выполняющей роль токового коллектора, была выбрана фольгированная коррозионностойкая сталь. Синтез проводился на установке Nanofab 800 Agile методом ПСХПО (плазмостимулированного химического парофазного осаждения) в среде ацетилена: массив УНТ высотой до 8 мкм с диаметром 40...50 нм синтезировался на катализаторе TiN/Ni (25/5 нм). РЭМ-фотография синтезированных трубок представлена на рис. 1. Катализатор предварительно осаждался методом магнетронного распыления металлов в едином вакуумном цикле.

Для создания псевдоконденсатора на основе массивов УНТ использовался метод атомного-слоевого осаждения (ACO) тонких слоев оксидов металла. В качестве оксидов металлов были выбраны TiO₂ и Al₂O₃.

Известно, что на поверхностях углеродных материалов, в том числе на УНТ, практически отсутствуют по-



Рис. 1. РЭМ-изображение "чистых" УНТ



Рис. 2. РЭМ-изображения электродов:

a — композит УНТ + TiO₂ (толщина 2,2 нм, осаждение без обработки N₂O); δ — УНТ + TiO₂ (толщина 2,2 нм, осаждение с обработкой N₂O)

верхностные активные группы (за исключением поверхностных дефектов). Данные материалы гидрофобны и проявляют инертность по отношению к большинству известных реагентов, применяемых в процессе ACO, что проявляется в неоднородности получаемого покрытия. Для образования функциональных групп на углеродной поверхности, играющих роль активных центров для последующего ACO, был разработан метод предварительной функционализации УНТ. В качестве технологии предварительной модификации УНТ была выбрана обработка опытных образцов в плазме газа N_2O [19]. Высокочастотный (ВЧ) плазменный разряд за счет наличия свободных активных радикалов способен обеспечить гидрофильность углеродной поверхности.

Функционализация на установке OxfordPlasmalab 100 проводится при следующих параметрах:

- мощность 100 Вт;
- давление газа 400 мТорр;
- температура подложки 40 °С;

Последующие процессы ACO были реализованы на установке PicosunR150 (Финляндия), оснащенной станцией генерации газа-носителя (азот, чистота 99,9999 %).

Для осаждения Al₂O₃ использовались Al(CH₃)₃ (TMA) и вода. Параметры осаждения:

- температура рабочей камеры..... 300 °С;
- давление в рабочей камере 1,5 мбар;
- расход газа-носителя в линии ТМА. . . 100 см³/мин;
- расход газа-носителя в линии H₂O.... 100 см³/мин.

Расход азота в реакционной камере составлял 300 см³/мин. Осаждение состоит из циклически повторяющихся этапов: напуск в камеру ТМА с помощью газа-носителя, продувка камеры азотом, напуск в камеру паров деионизованной воды, продувка камеры азотом. Перечисленные этапы образуют один реакционный цикл процесса ACO оксида алюминия. Скорость осаждения пленки оксида алюминия равна 0,097 нм/цикл. Число циклов ACO выбирается исходя из требуемой толщины оксидного слоя.

Для осаждения TiO_2 использовались $Ti(OH_5C_2)_4$ (EtTi) и вода. Параметры осаждения:

- температура рабочей камеры..... 300 °С;
- температура источника EtTi 145 °C;
- давление в рабочей камере 1,5 мбар;
- расход газа-носителя в линии EtTi . . . 150 см³/мин;
- расход газа-носителя в линии H₂O . . . 100 см³/мин.

Расход азота в реакционной камере $300 \text{ см}^3/\text{мин.}$ Осаждение также состоит из циклически повторяющихся этапов: напуск в камеру EtTi с помощью газа-носителя, продувка камеры азотом, напуск в камеру паров деионизованной воды, продувка камеры азотом. Скорость осаждения пленки оксида титана равна 0,033 нм/цикл.

Результаты и обсуждение

В результате исследования морфологии поверхности композитов с помощью РЭМ было обнаружено, что без проведения предварительной функционализации поверхности нанотрубок в плазме N_2O оксиды титана и алюминия покрывают поверхность структур лишь частично (рис. 2, *a*). В случае проведения обработки слой оксида полностью покрывает поверхность УНТ (рис. 2, *б*). Толщины наносимых оксидов изменялись от тонкого, толщиной 2,5 нм (при этом оставалось свободное пространство между отдельными трубками), до толстого, толщиной 18 нм, когда все пространство между УНТ заполнялось оксидом.

С помощью автоматизированного стенда зарядного устройства проводились циклические измерения зарядно-разрядных кривых, на основании которых определялись емкостные характеристики суперконденсаторов. Ток заряда во всех случаях был 100 мкА, а ток разряда 50 мкА. Напряжение изменялось в диапазоне от 0 до 2 В.

На рис. 3 представлен график изменения напряжения на электродах суперконденсатора на основе УНТ, по-





Таблица 2

Емкостные характеристики суперконденсаторов с электродами на основе композита УНТ/оксид металла

N⁰	Электроды	Емкость, мФ
1	УНТ	4,2
2	УНТ +2,5 нм TiO ₂	40,8
3	УНТ + 2,5 нм Al ₂ O ₃	19,9
4	УНТ + 6,6 нм TiO ₂	17,3
5	УНТ + 18 нм Al ₂ O ₃	8,1
6	УНТ + 18 нм TiO ₂	11

крытых слоем TiO₂ толщиной 2,5 нм, в процессе заряда—разряда. Аналогичные зависимости были получены для всех образцов. Характерным является "провал" напряжения на 0,5 В в первый момент времени при переходе в режим "разряда", который можно связать со значительным последовательным сопротивлением устройства. Экспериментальное значение внутреннего сопротивления для всех образцов составило порядка 5 кОм, основной вклад в которое вносят низкая проводимость самих УНТ и большое контактное сопротивление нанотрубка-подложка.

Результаты измерения емкости приведены в табл. 2. Емкость суперконденсатора на основе "чистых" УНТ составила всего 4,2 мФ. При осаждении тонких слоев оксида титана и алюминия емкость составляла уже 40,8 мФ и 19,9 мФ соответственно. Осаждение более толстых слоев не дает такого значительного прироста — суперконденсаторы с толщинами оксида алюминия и титана 18 нм накапливают 8,1 и 11,0 мФ. Такая нелинейная зависимость вполне логична и может быть связана с тем, что при нанесении более толстых слоев оксидов пространство между трубками полностью заполняется, уменьшая активную площадь поверхности, и накопление заряда происходит в основном за счет псевдоемкости, в то время как для более тонких слоев вклад двойного электрического слоя в общую емкость остается значительным.

Выводы

В результате исследования было обнаружено, что использование наноструктурированных электродов на основе композита УНТ/оксид металла позволяет увеличить удельную емкость суперконденсатора почти в 10 раз. Экспериментально показано, что увеличение толщины слоя оксида выше определенного значения не приводит к повышению емкости, а наоборот, снижает ее. Подобную нелинейную зависимость можно связать с уменьшением площади активной поверхности, при которой происходит изменение механизма накопления заряда от двойного электрического слоя до фарадеевского, когда аккумуляция электрической энергии происходит за счет обратимых окислительных реакций сугубо в поверхностном слое электрода. Максимальное значение емкости наблюдалось для самых тонких слоев оксида металла, когда оба механизма работают одновременно, образуя эффективное гибридное устройство. Поэтому важнейшей задачей является определение оптимальной толщины осаждаемых слоев. Также повысить производительность и эффективность работы СК можно за счет снижения сопротивления оксидов путем их легирования и повышения аспектности электродов на основе УНТ.

Список литературы

1. Bose S., Kuila T., Mishra A. K., Rajasekar R., Kim N. H. and Lee J. H. Carbon-based nanostructured materials and their composites as supercapacitor electrodes // Journal of Materials Chemistry. 2012. V. 22, N 3. P. 767–784.

2. **Zhang L. L. and Zhao X. S.** Carbon-based materials as supercapacitor electrodes // Chemical Society Reviews. 2009. V. 38. P. 2520–2531.

3. **Conway B. E.** Electrochemical Supercapacitors: Scientific Fundamentals and Technological Applications. Plenum Pub Corp. 1999. 698 p.

4. Jiang H., Ma J. and Li C. Z. Mesoporous Carbon Incorporated Metal Oxide Nanomaterials as Supercapacitor Electrodes // Advanced. Materials. 2012. V. 24. P. 4197–4202.

5. Lokhande C. D., Dubal D. P. and Joo O. S. Curr. Metal oxide thin film based supercapacitors // Current Applied Physics. 2011. V. 11. P. 255–270.

6. Stoller M. D., Magnuson C. W., Zhu Y. W., Murali S., Suk J. W., Piner R. and Ruoff R. S. Interfacial capacitance of single layer graphene // Energy & Environmental Science. 2011. V. 4. P. 4685–4689.

7. **Frackowiak E. and Beguin F.** Carbon materials for the electrochemical storage of energy in capacitors // Carbon. 2001. V. 39. P. 937–950.

8. Громов Д. Г., Галперин В. А., Миронов А. Е. и др. Емкостные свойства конденсаторной структуры с двойным электрическим слоем на основе углеродных нанотрубок и ортофосфорной кислоты // Изв. вузов. Электроника. 2013. № 6 (104). С. 39—44.

9. Lee J. Y., Liang K., An K. H. and Lee Y. H. Nickel oxide/ carbon nanotubes nanocomposite for electrochemical capacitance // Synthetic Metals. 2005. V. 150. P. 153–157.

10. Yan D. L., Guo Z. L., Zhu G. S., Yu Z. Z., Xu H. R. and Yu A. B. MnO₂ film with three-dimensional structure prepared by hydrothermal process for supercapacitor // Journal of Power Sources. 2012. V. 199. P. 409–412.

11. **Duan B. R. and Cao Q.** Hierarchically porous Co3O4 film prepared by hydrothermal synthesis method based on colloidal crystal template for supercapacitor application // Electrochimica Acta. 2012. V. 64. P. 154–161.

12. Sun X., Xie M., Wang G. K., Sun H. T., Cavanagh A. S., Travis J. J., George S. M. and Lian J. Atomic Layer Deposition of TiO₂ on Graphene for Supercapacitors // Journal of The Electrochemical Society. 2012. V. 159. P. A364—A369.

13. Chen X. Y., Pomerantseva E., Banerjee P., Gregorczyk K., Ghodssi R. and Rubloff G. Ozone-Based Atomic Layer Deposition of Crystalline V₂O₅ Films for High Performance Electrochemical Energy Storage // Chemistry of Materials. 2012. V. 24. P. 1255–1261.

14. Lu P., Xue D., Yang H. and Liu Y. Supercapacitor and nanoscale research towards electrochemical energy storage // International Journal of Smart and Nano Materials. 2012. V. 4. P. 2–26.

15. **Toupin M., Brousse T. and B'elanger D.** Charge Storage Mechanism of MnO₂ Electrode Used in Aqueous Electrochemical Capacitor // Chemistry of Materials. 2004. V. 16. P. 3184–3190.

16. Kong D. S., Wang J. M., Shao H. B., Zhang J. Q. and Cao C. N. Electrochemical fabrication of a porous nanostructured nickel hydroxide film electrode with superior pseudocapacitive performance // Journal of Alloys and Compounds. 2011. V. 509. P. 5611–5616.

17. Rakhi R. B., Chen W., Cha D. K. and Alshareef H. N. Substrate Dependent Self-Organization of Mesoporous Cobalt Oxide Nanowires with Remarkable Pseudocapacitance // Nano Letters. 2012. V. 12. P. 2559–2567.

18. Adeyemo A., Hunterb G. and Dutta P. K. Interaction of CO with hydrous ruthenium oxide and development of a chemoresistive ambient CO sensor // Sensors and Actuators B. 2011. V. 152. P. 307–315.

10. Markeev A. M., Chernikova A. G., Chouprik A. A., Zaitsev S. A., Ovchinnikov D. V., Holger A., Dorfler S. Atomic layer deposition of Al_2O_3 and $Al_xTi_{1-x}O_y$ thin films on N₂O pretreated carbon materials // Journal of Vacuum Science and Technology A. 2013. V. 31(1). P. 01A135–01A135-5. V. A. Galperin¹, Senior Researcher, D. G. Gromov², Leader Researcher, E. P. Kitsyuk², Junior Researcher, A. M. Markeev³, Research Scientist, E. A. Lebedev², Junior Researcher, A. G. Chernikova³, Engineer, **S. V. Dubkov**⁴, Engineer ¹ Institute of Nanotechnology of Microelectronics RAS

² Scientific-Manufacturing Complex "Technological Centre" MIET

³ The Federal State Educational Institution of Higher Professional Education, "Moscow Institute of Physics and Technology" (State University)

⁴ National Research University of Electronic Technology

CNT-BASED SUPERCAPACITOR WITH THIN METAL OXIDE LAYERS PSEUDOCAPACITY

In this work, pseudocapacitance role in summary capacitance of supercapacitor has been researched. Multiple increase capacitance of supercapacitor with carbon nanotubes based electrodes, coated by thin layers Al_2O_3 and TiO_2 atomic layer deposition method was showed.

Keywords: supercapacitor, electrical double layer, pseudocapacitor, carbon nanotubes, atomic layer deposition

УДК 621.3.049.77; 621.316.56

А. А. Антонов¹, аспирант, М. С. Карпович², инж.-конструктор, И. В. Пичугин², инж.-конструктор, А. А. Курленко¹, инж.-конструктор, В. Ю. Васильев¹, д-р хим. наук, зам. директора ¹ ООО "РАМИТ", Новосибирск ² ООО "СибИС", Новосибирск

ИНТЕГРАЛЬНАЯ МИКРОСХЕМА ДРАЙВЕРА "МЯГКОЙ" КОММУТАЦИИ СИЛОВЫХ КЛЮЧЕЙ ДЛЯ МОШНЫХ ИСТОЧНИКОВ ЭЛЕКТРОПИТАНИЯ

Представлены результаты макетирования, моделирования и конструирования топологии тестовой интегральной микросхемы драйвера "мягкой" коммутации силовых ключей Zero Voltage Switch, предназначенной для применения в мощных высокоэффективных источниках вторичного электропитания.

Ключевые слова: источники электропитания, "мягкая" коммутация силовых ключей, Zero Voltage Switch (ZVS), интегральная микросхема

Введение

Преобразователи мощности или источники вторичного электропитания (ИВЭП), реализуемые в вариантах AC/DC и DC/DC, являются неотьемлемой силовой частью радиоэлектронных комплексов, бытовой электроники, систем бесперебойного питания информационных и телекоммуникационных комплексов, автомобильной электроники, преобразователей энергии возобновляемых источников, многих промышленных интеллектуальных систем и т. д. В ходе эксплуатации в составе комплексов ИВЭП должны обеспечивать высокие надежность, удельные показатели, управляемость, устойчивость в динамических режимах, электромагнитную совместимость.

Качество изготовления современных силовых полупроводниковых приборов позволило значительно повысить их быстродействие и допустимые рабочие токи, что привело к улучшению массогабаритных показателей при повышении частоты преобразования до нескольких сот килогерц. Однако без применения специальных мер (алгоритмических и схемных решений по снижению коммутационных потерь, максимально учитывающих особенности структуры прибора) невозможно разработать ИВЭП с высокими удельными и энергетическими показателями.

В связи с этим в мировой практике последнего десятилетия определены основные тенденции развития АС/DC ИВЭП на базе импульсных высокочастотных технологий с использованием способов "мягкой коммутации" (далее — МК, по зарубежной терминологии — "soft switching" [1]) силовых ключей. Суть идеологии МК сводится к прямому или косвенному контролю текущих параметров силового ключа (напряжения, тока, напряжения насыщения, скорости изменения напряжения и ряда других) и формированию соответствующей коррекции базовых управляющих воздействий, что позволяет добиться снижения динамических потерь переключения, улучшения показателей безотказного функционирования и снижения уровня электромагнитных помех. Это крайне важно для радиотехнических и телекоммуникационных систем. Функции контроля обеспечивает буферное устройство, совмещенное с драйвером силового ключа. Помимо резонансных режимов МК, различают режимы МК, обеспечивающие включение силового транзистора при нулевом уровне тока I (по зарубежной терминологии — Zero Current Switch, ZCS) и/или выключение при нулевом напряжении U (по зарубежной терминологии — Zero Voltage Switch, ZVS) [2].

Отметим, что специализированные интегральные микросхемы (ИМС) и микроконтроллеры, позволяющие реализовать различные приемы коммутации силовых ключей, чаще всего требуют применения гальванической развязки от силовых ключей и промежуточных буферных усилителей, а также организации цепей детектирования напряжений и токов. К тому же специализированные ИМС в основном рассчитаны на реализацию резонансных режимов работы преобразователя, отличных от режимов ZVS-ZCS, и не позволяют ИВЭП работать в аварийных режимах, вызванных, например, зависанием программы, выходом из строя микроконтроллера и т. д. [3].

В данной работе представлены результаты разработки тестовой ИМС интеллектуального адаптивного драйвера "мягкой" коммутации (МК) силовых ключей в режиме ZVS (драйвер D-ZVS, далее — D-ZVS), предназначенного для использования в мощных высокоэффективных модульных ИВЭП с мощностью выше 2 кВт. Приведены результаты макетирования и экспериментальной проверки режимов работы драйвера D-ZVS на макете полумостового инвертора, а также результаты моделирования и разработки конструкции тестовой ИМС.

1. Особенности реализации режима "мягкой" коммутации ZVS

Технология "мягкой" коммутации силовых ключей ZVS [1, 2] предполагает организацию условий для перевода тока из полупроводниковой зоны запираемого ключа в периферийные цепи при нуле или близком к нулевому значению напряжения на его силовых зажимах и включение транзистора при нуле напряжения (рис. 1). Таким образом, низкое (близкое к нулю) напряжение "коллектор-эмиттер" ("сток-исток") является обязательным условием выключения транзистора. Объяснение этого требования также показано на рис. 1 и заключается в минимальных потерях энергии при включении и выключении транзистора (E_{ON} и E_{OFF} , соответственно). Одним из распространенных решений для реализации этого условия в стойке ключей является шунтирование ключей конденсаторами и обеспечение условий для их периодического перезаряда синхронно с частотой переключения. Необходимость шунтирующих емкостей обусловлена условием непрерывности тока индуктивности







Рис. 2. Структурная схема (*a*) и внешний вид (б) прототипа драйвера D-ZVS

при запирании транзистора. На стадии запирания транзистора ток индуктивности заряжает конденсатор выключаемого транзистора и разряжает конденсатор, шунтирующий второй транзистор. Скорость изменения напряжения на конденсаторах зависит от значений максимального тока I_L , суммарной емкости шунтирующих конденсаторов и скорости запирания транзистора, обусловленной особенностью механизма рассасывания носителей тока в дрейфовой зоне (БТИЗ) и разряда затворной емкости (МОПТ, БТИЗ) [4].

Следует отметить, что ряд разработчиков силовых транзисторов нового (третьего) поколения (серии H3) ориентирует их на применение в режиме, подобном описанному выше. Например, серия транзисторов IKW25N120H3 допускает при частотах переключения 100...200 кГц работу с токами $I_{\rm max} = 20...30$ A [5].

2. Макетирование и тестирование драйвера "мягкой" коммутации D-ZVS

В соответствии с алгоритмом МК ZVS был разработан драйвер силовых ключей (D-ZVS) в режиме ZVS. На рис. 2, *а* представлена схема драйвера D-ZVS, а на рис. 2, δ — внешний вид прототипа драйвера D-ZVS на печатной плате 45 × 55 мм. Расчетная осциллограмма (рис. 3, *a*), полученная в результате схемотехнического моделирования электрической схемы драйвера D-ZVS, показывает, что силовой ключ переводится в открытый режим при напряжении "сток—исток", близком к нулю. При этом ток силового ключа начинает линейно нарастать с нулевого значения, что также соответствует режи-



Рис. 3. Характеристика драйвера D-ZVS: расчетные (*a*) и экспериментальные (δ) эпюры напряжения и тока

му MK ZCS. Рост тока линеен на всем интервале проводимости и прекращается на уровне запрограммированного максимума. Далее следуют короткая фаза удержания тока и резкий его спад до нуля, сопровождаемый ростом напряжения на силовом ключе. Высокое напряжение на силовом ключе появляется после завершения фазы протекания тока, что определяет режим ZVS. На рис. 3, б представлены эпюры напряжения и тока, полученные в результате экспериментального измерения прототипа драйвера D-ZVS, которые подтверждают модельные характеристики, показанные на рис. 3, а. Исследования проводили на осциллографе Tektronix MSO2024. На рис. 3 1 — напряжение на силовом ключе; 2 — ток ключа. Выбросы и апериодические колебания были получены на этапе моделирования путем искусственного добавления в силовой контур паразитных элементов. Эксперимент показал, что в сравнении с результатами моделирования паразитные явления на начальной и завершающей стадиях интервала работы ключа выражены более интенсивно, что связано с неточностью оценки паразитных связей в силовом контуре макета. Несмотря на этот факт, прототип продемонстрировал качественное соответствие модели, стабильность и управляемость процесса переключения силового транзистора в соответствии с заданным режимом. Полученные результаты были подтверждены еще на трех изготовленных образцах драйвера D-ZVS. Таким образом, разработанный драйвер D-ZVS обеспечивает коммутацию силового ключа в режиме MK ZVS-ZCS. Скорость роста напряжения на силовом ключе определяется параметрами контура силовой части.

Исследования функционирования прототипов драйверов D-ZVS были проведены в составе макета полумостового инвертора с диодным выходным выпрямителем, что, по существу, является полным DC/DC-конвертором (рис. 4, *a*). В работе [4] были рассмотрены схема стойки ключей с необходимым обрамлением для реализации режима MK ZVS, диаграммы работы преобразователя на ее основе, расчетные соотношения и пример расчета основных параметров преобразователя, а также полная схема преобразователя, выполненного на базе мостового инвертора мощностью порядка 5 кВт.

На рис. 4, б представлены эпюры напряжений, полученные методом Spice-моделирования и полностью характеризующие работу нижней пары "драйвер-ключ" полумостовой стойки: напряжение "сток-исток" (кривая I), ток ключа (кривая 2), напряжение "затвор-исток" (кривая 3). Напряжение первичного источника высокого напряжения составляло 400 В, сопротивление нагрузки — 1,0 Ом. Как следует из графиков, ток ключа имеет пилообразную форму с частотой повторения $f \approx 250$ кГц $(T \approx 4 \text{ мкс})$ и амплитудой $I_m = 26 \text{ A}$. Выходное напряжение составило 50 В (среднее значение) на нагрузке 1 Ом. Это позволило оценить эффективность DC/DC-конвертора с использованием технологии ZVS, функционирующего на частоте 250 кГц, совместно с выходным выпрямителем диодного типа. Потребляемая мощность составила 2600 Вт, выходная мощность — (в среднем) 2500 Вт, расчетная эффективность DC/DC-конвертора близка к значению 96 %. С учетом потерь мощности на выходных диодах (около 60 Вт) потери в звене полумостовой стойки инвертора составили 40 Вт, по 20 Вт на силовой ключ. Стоит отметить, в расчетной модели не учитывали потери в индуктивных элементах и межсоединениях.



Рис. 4. Электрическая схема полумостового DC/DC-конвертора с драйверами D-ZVS (DR1 и DR2) (*a*) и расчетные эпюры (б) напряжений и тока нижнего ключа полумостовой стойки (выделен слева): "сток—исток" (1), ток ключа (2), напряжение "затвор исток" (3)



Рис. 5. Экспериментальные эпюры напряжений нижнего ключа полумостовой стойки: напряжение "сток—исток" (1) и ток ключа (2) (a), напряжения "сток—исток" (1) и "затвор—исток" (3) (б)

На рис. 5 представлены эпюры напряжений, полученные в результате исследования экспериментального макета DC/DC-конвертора: "сток—исток" и ток ключа (падение напряжения на токовом шунте), "сток—исток" и "затвор—исток". Напряжение "сток—исток" является синхронизирующим. При исследовании экспериментального макета DC/DC-конвертора были получены следующие данные: при выходной мощности 2000 Вт значение эффективности 94 % и суммарные потери мощности около 130 Вт. Потери мощности на индуктивных элементах составили около 30 Вт. Эти данные позволяют утверждать, что при интеграции звена DC/DC-конвертора в состав АС/DC ИВЭП и дальнейшей его конструктивной оптимизации, ожидаемый КПД ИВЭП будет составлять 90 % и более.

Измерения подтвердили результаты моделирования и, как и в случае исследования прототипа драйвера D-ZVS, единственное расхождение с моделью наблюдается в наличии паразитных эффектов. Эти явления могут повлиять на стабильность системы на высокой частоте, но наибольшее их влияние будет связано с мощными наводками на шинах управления и контроля. Из этого факта следует, что для стабильного функционирования ИВЭП на частоте более 200 кГц следует тщательно прорабатывать силовые межсоединения на печатной плате и отказаться от навесного монтажа. Результаты исследования уровней электромагнитных помех (ЭМП), создаваемых "классическим" ИВЭП и макетом DC/DC-конвертора с интегрированными модулями драйверов D-ZVS в диапазоне 100 кГц...1000 МГц, приведены в работе [6]. Использование модулей драйверов D-ZVS в составе макета DC/DC-конвертора позволяет снизить уровень ЭМП не менее, чем на 20 дБ/мкВ.

3. Разработка тестовой ИМС драйвера "мягкой" коммутации ключей D-ZVS

Одной из главных задач современной электроники является совмещение на одном кристалле силовых транзисторов и сопутствующих им интегральных микросхем управления. Существует ряд причин, по которым дискретная реализация силового ключа и узла управления уступает в надежности интегральному исполнению, в котором становится возможным реализация схем защиты от перегрузок силового элемента, защиты от перегрева, дополнительные способы коммутации и управления транзистором. Такие системы, реализованные на одном кристалле, носят название "интеллектуальные силовые ключи" (ИСК) [7].

При разработке тестовой интегральной микросхемы драйвера (ИМС D-ZVS) было проведено всестороннее технологическое моделирование с использованием программ Sentaurus TCAD для определения параметров узлов драйвера D-ZVS в интегральном исполнении. На рис. 6 представлен один из результатов расчета — ВАХ *N*-канального транзистора (сечение представлено во врезке). По результатам моделирования был сделан вывод о возможности реализации ИМС D-ZVS с использованием различных существующих технологий ИМС. Например, необходимые электрофизические параметры $(I_D = 10 \text{ A} \text{ при } U_{DS} = 15 \text{ B})$ могут быть получены с использованием стандартной КМОП-технологии с проектно-технологическими нормами 3,0 мкм путем внесения корректировок в стандартный технологический маршрут. Диэлектрическая изоляция свыше 600 В может быть по-



Рис. 6. Сравнение семейства выходных ВАХ *N*-МОП — транзистора на подложке КЭФ-4,5 с длинами каналов L = 4 мкм, L = 6 мкм и L = 8 мкм



Рис. 7. Структурная схема (а) и топология (б) разработанной ИМС драйвера D-ZVS

лучена при использовании высокоомных подложек (типа КЭФ-40). После всестороннего анализа современных технологических возможностей проектирования и изготовления наиболее приемлемым вариантом для реализации ИМС драйвера D-ZVS была признана КМОП-технология массового производства субмикронных ИМС проектно-технологического уровня 0,18 мкм, имеющая набор дополнительных конструктивно-технологических опций в виде аналого-цифровых, радиочастотных и, главное — высоковольтных опций.

На рис. 7, *а* приведена структурная схема тестовой ИМС драйвера, где 1 — блок детектирования напряжения на силовом ключе; 2 — блок управления; 3 — выходной буферный усилитель; 4 — блок настройки параметров и режима функционирования; 5 — датчик тока силового ключа; 6 — блок понижения напряжения высоковольтной шины (является внешним или внутренним, в зависимости от возможности технологии ИМС обеспечить диэлектрическую изоляцию элементов свыше 600 В).

На рис. 7, б приведен топологический рисунок тестовой ИМС драйвера D-ZVS, размер которой составляет 2,3 × 2,3 мм. Разработанная ИМС имеет следующие проектные электрические характеристики: рабочее напряжение микросхемы (питания и выходное) 10...30 В, частота функционирования 30...700 кГц, максимальный импульсный выходной ток микросхемы (при напряжении питания 15 В, нагрузке 15 нФ) 15 А, ток потребления микросхемы (при частоте 200 кГц, напряжении питания 15 В, нагрузке 15 нФ и максимальном выходном токе) не

превышает 200 мА. Тестовая ИМС имеет 44 площадки ввода-вывода. Необходимость создания сильноточных и высокочастотных площадок поставила задачу разработки новой методики проектирования площадок ввода-вывода ИМС для их применения в низкочастотных, сильноточных, с повышенной защитой от статического электричества, высокочастотных сильноточных, сверхвысокочастотных приложениях. Данная методология должна учитывать паразитные эффекты контактных площадок и корпуса ИМС, защитные элементы, частотные свойства площадки в зависимости от конфигурации элементов. В целях верификации моделей и методики проектирования в состав разработанной тестовой ИМС введен ряд уникальных аналоговых площадок вводавывода (в частности, 16 площадок с повышенной токовой нагрузкой), которые были разработаны в рамках собственной методологии проектирования выводов.

Заключение

Разработанный драйвер D-ZVS позволяет разрабатывать преобразователи электрической энергии с использованием технологии MK ZVS-ZCS. Комбинирование MK ZVS с другим приемом MK ZCS открывает возможность создания высокоэффективных единичных модулей ИВЭП мощностью 5...9 кВт при постоянном напряжении на входе инверторного звена 500...600 В. Энергетическая эффективность (более 90 %) преобразователя большой мощности сохраняется при относительно высокой частоте коммутации силовых ключей (200...250 кГц), что невозможно реализовать при использовании режимов "жесткой" коммутации силовых ключей. Следствием применения приемов МК является увеличение удельных объемных и массогабаритных показателей источников, снижение уровня генерируемых ЭМ помех на 20 дБ/мкВ в среднем. Выполнены работы по макетированию, моделированию и конструированию топологии субмикрометровой тестовой интегральной микросхемы драйвера "мягкой" коммутации силовых ключей Zero Voltage Switch, предназначенной для применения в мощных высокоэффективных источниках вторичного электропитания. Проведена разработка аналоговых площадок по новой методике, позволяющей реализовать сильноточные и высокочастотные контактные площадки ИМС.

Авторы выражают благодарность проф. Ю. Д. Козляеву и с. н. с. Ю. Е. Семенову за плодотворные дискуссии и ценные советы, высказанные при выполнении работы и подготовке рукописи к печати.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования и науки РФ в рамках реализации НИР "Исследование перспективных типов сверхвысокочастотных приборов, разработка технологических принципов их изготовления (СБИС широкополосного СВЧ локатора малой дистанции в диапазоне частот 3—11 ГГц)" (ГК № 14.427.11.0005).

Список литературы

1. Wintrich A., Nicolai U., Tursky W., Reimann T. Application Manual Power Semiconductors. ISLE Verlag, 2011.

2. Mohan N., Undeland T. M., Robbins W. P. In Power electronics. Converters, applications and design / John Wiley and Sons, Inc., 2003. P. 249–298.

3. 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. № 1. С. 75—84.

4. 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. № 4. С. 35—46.

5. **Компания Infineon:** веб-сайт URL: http://www.infineon. com/dgdl/DS_IKW25N120H3_1_2.pdf?folderId=db3a3043156

fd5730115f56849b61941&fileId=db3a304340e762c80140ed6d64 cf2df4 (дата обращения: 05.08.2013).

6. Васильев В. Ю., Антонов А. А., Пичугин И. В., Гордиенко С. М. Разработка источников вторичного электропитания, реализованных с использованием технологии "мягкой" коммутации ключей. Часть 3. Разработка макета силового модуля источника питания // Вестник СибГУТИ. 2013. № 2. С. 75—85.

7. Трудновская Е., Лагун А., Машевич П., Воробьев А., Сладков М., Лукьянов А., Таболкин А. Интеллектуальные силовые ключи. Технологические и схемотехнические проблемы монолитной интеграции // Силовая электроника. 2011. Вып. 4. С. 60—64.

A. A. Antonov¹, Graduat Student, **M. S. Karpovich**², Engineer, **I. V. Pichugin**², Engineer, **A. A. Kurlenko**¹, Engineer, **V. V. Variburg**¹, Deputy Director on Sciences

V. Yu. Vasilyev¹, Deputy Director on Science ¹ RAMIT LLC, Russia, Novosibirsk

² SibIS LLC, Russia, Novosibirsk

INTEGRATED CIRCUIT DRIVER FOR POWER KEY SOFT-SWITCHING IN POWER CONVERTERS

This paper represents the results obtained in development of submicron integrated circuit driver for power keys implementing softswitching technology Zero Voltage Switch, dedicated for the use in high-power high-efficiency power converters.

Keywords: power converters, power supply units, power key soft switching, Zero Voltage Switch (ZVS), integrated circuits

УДК 621.3.049.77.002

А. В. Суханов, аспирант, инженер-конструктор, e-mail: aksernar@yandex.ru, **И. В. Прокофьев**, ст. науч. сотр., e-mail: ip_icnt@mail.ru, **Д. В. Гусев**, ст. науч. сотр., e-mail: d.gusev@tcen.ru НПК "Технологический центр МИЭТ"

МУЛЬТИАГЕНТНАЯ СИСТЕМА МОНИТОРИНГА WEB-ДАТЧИКОВ, СОЗДАННАЯ НА ОСНОВЕ НАНОСЕНСОРИКИ

Приведены результаты исследования и разработки мультиагентной системы мониторинга web-датчиков, созданной на основе наносенсорики. Разработан web-датчик, в состав которого входят: кристалл анизотропного магниторезистивного преобразователя магнитного поля, а также высокочувствительный элемент определения отравляющего вещества — угарного газа. Разработано программное обеспечение для макета мультиагентной системы мониторинга с функциями удаленного доступа, возможностью визуализации, анализа и хранения полученных данных.

Ключевые слова: система мониторинга, сенсорная сеть, ethernet, микросервер, web-датчик, наносенсорика, удаленный доступ, преобразователи магнитного поля, тонкопленочный магниторезистор, датчик загазованности

Анализ материалов зарубежной и отечественной научно-технической литературы показывает, что бурное развитие МЭМС- и НЭМС-технологий в области создания сенсоров различной направленности спровоцировало рост спроса на системы удаленного мониторинга. Резкое снижение стоимости как самих сенсоров, так и средств коммуникации, позволяет создавать эффективные системы контроля среды в различных областях применения. При этом возможность использования Интернета в качестве среды передачи данных выводит web-датчики на первый план при проектировании различных систем мониторинга. Исследование, разработка и создание миниатюрных web-датчиков на основе наносенсорики, а также создание макета мультиагентной системы мониторинга на их основе с функциями удаленного доступа и возможностью визуализации полученных данных являются актуальной задачей для применения в различных областях жизнедеятельности человека. Данная задача объединяет в себе набор новых схемотехнических, конструктивнотехнологических решений и подходов для построения автономных миниатюрных web-датчиков различных преобразователей и мультиагентных систем мониторинга на



Рис. 1. Общий вид web-датчика, созданного на основе наносенсорики

их основе. В работе решались задачи, связанные с разработкой:

- схемотехнических и конструктивно-технологических методов интеграции в рамках единой миниатюрной конструкции наносенсоров и специальной электронной компонентной базы;
- алгоритмов и специального программного обеспечения (ПО) работы web-датчиков;
- специального ПО удаленного доступа для мультиагентной системы мониторинга.

Для функционирования web-датчика (рис. 1) в составе мультиагентной системы мониторинга разработано специальное ПО с функциями микросервера и с функциями опроса сенсорного чувствительного преобразователя — датчика магнитного поля или любого другого. В основу ПО заложен ТСР/ІР-стек на микроконтроллере с RISC-архитектурой. Работа стека ПО на микроконтроллере реализована на кооперативной (не вытесняющей) многозадачности в виде конечного автомата. Этот тип многозадачности наименее требователен к ресурсам вычислительной системы и позволяет использовать не вытесняющие операционные системы даже на простейших 8-битных микроконтроллерах. Уровни МАС и РНУ обеспечиваются аппаратно, для связи с ними в стеке предусматривается программный драйвер. Протокол IP работает в пассивном режиме,

т. е. обрабатывает пакеты по запросам с других уровней. Уровень TCP является важным и основным уровнем в стеке, именно в нем реализован конечный автомат обработки пакетов. Данный стек при правильной конфигурации позволяет работать с протоколами всех уровней модели OSI: ARP, IP, ICMP, TCP, UDP, TFTP, HTTP, SNMP, DHCP.

Для обеспечения информационной безопасности web-датчиков с микросерверами обычно предусматривается дополнительный уровень — уровень защищенных сокетов (SSL), который обеспечивается специальными криптографическими протоколами. Для обеспечения простой передачи данных с web-датчика и взаимодействия с пользователем мультиагентных систем используется серверный механизм Common Gateway Interface (CGI). Программу, которая работает по такому интерфейсу совместно с веб-сервером, принято называть шлюзом. Интерфейс CGI позволяет использовать, обрабатывать и передавать данные web-датчика, созданного на основе наносенсорики, через Интернет.

Разработанная мультиагентная система мониторинга состоит из нескольких территориально распределенных web-датчиков, созданных на основе наносенсорики — преобразователя напряженности магнитного поля, а также высокочувствительного элемента отравляющего вещества — угарного газа.

В состав web-датчика (рис. 2) для мультиагентных систем мониторинга входит кристалл анизотропного магниторезистивного преобразователя (АМРП) магнитного поля, который изготовляется на основе кремниевой подложки с применением групповой интегральной технологии [1, 2]. Кристалл имеет в своем составе четыре составных тонкопленочных магниторезистора, которых объединяют в мост Уитстона, а также две функциональноинтегрированные катушки подмагничивания (ФИКП). Составные тонкопленочные магниторезисторы (СТПМР) состоят из 20 полосок, включенных последовательно, и ориентированы так, что в двух противоположных плечах моста Уитстона СТПМР расположены под углом 45°, а в двух других противоположных плечах моста Уитстона СТПМР — под углом 135° относительно оси легкого намагничивания (ОЛН). Такое расположение СТПМР относительно ОЛН позволяет реализовать нечетный тип передаточной характеристики АМРП. Первая ФИКП предназначена для корректировки уровня выходного сигнала и называется "offset". Она электрически изолирована от СТПМР и реализована на основе 2-го уровня металла так, что генерируемое током магнитное поле имеет коллинеарное направление с измеряемым. Вторая ФИКП предназначена для снижения влияния гистерезиса СТПМР путем их перемагничивания с помощью кратковременных импульсов тока и называется "Set/Reset", по аналогии с зарубежными аналогами АМРП. Вторая ФИКП на основе 3-го уровня металла располагается так, что генерируемое магнитное поле совпадает с направлением ОЛН. Крутизна преобразования АМРП, полученного на осно-



Рис. 2. Структурная схема web-датчика



Рис. 3. Интерфейс приложения для сбора и анализа полученных данных с web-датчиков, созданных на основе наносенсорики



Рис. 4. Интерфейс приложения сбора и анализа полученных данных с web-датчиков на основе высокочувствительных элементов определения отравляющих веществ

НАНО- И МИКРОСИСТЕМНАЯ ТЕХНИКА, № 6, 2014 -

44

ве пленки Ti/FeNiCo20/Ti, составила 0,3...0,4 мB/($B \cdot \Im$), в линейном диапазоне ±6 Э. Применение в конструкции АМРП ферромагнитных пленок с меньшим содержанием кобальта (FeNiCo6) увеличивает крутизну преобразования до 0,53 мB/($B \cdot \Im$), но линейный диапазон при аналогичных с предыдущей структурой критериях оценки снижается до ±4 Э.

В состав web-датчика для мультиагентных систем мониторинга также входит высокочувствительный элемент определения отравляющего вещества — угарного газа. Принцип работы электрохимического сенсора для обнаружения угарного газа заключается в следующем: газ через противопылевой фильтр (выполняющий кроме того функцию селективного фильтра) и гидрофобную мембрану попадает на газопроницаемый измерительный электрод из благородного металла. Высвобождающиеся при этом электроны проходят через электролит и эталонный электрод и образуют во внешней цепи электрический ток. Сила этого тока прямо пропорциональна концентрации измеряемого газа. С помощью контрэлектрода потенциал электродов поддерживается на постоянном уровне, значительно повышая стабильность сенсора и улучшая его измерительные свойства. Высокочувствительный элемент определения отравляющего вещества работает с внутренней памятью EEPROM, в которой хранятся калибровочные константы. Встроенный датчик температуры в сенсоре высокочувствительного элемента на основе резистора позволяет проводить температурную компенсацию чувствительности. Диапазон измерений угарного газа от 0 до 300 мг/м³, при этом максимальная погрешность преобразования при нормальных условиях эксплуатации не более ±15 мг/м³, потребляемый ток в рабочем режиме составляет не более 1200 мкА, а в "спящем режиме" — не более 200 мкА.

Для построения мультиагентной системы мониторинга web-датчиков, созданных на основе наносенсорики, было создано специальное ПО с функциями анализа, сбора и обработки информации в режиме реального времени. Для этого потребовался центральный пункт оператора в виде персонального компьютера, подключенного к Интернету, на котором было установлено сетевое ПО [3]. В состав программно-аппаратного комплекса входит реляционная база данных MySQL и приложение для работы с сетевыми протоколами высоких уровней модели OSI: TFTP, HTTP, SNMP и т. д. Сетевое приложение (рис. 3, 4), установленное на центральном пункте оператора, позволяет визуально отображать полученные данные с нескольких web-датчиков в виде интерактивных графиков с возможностями автоматического масштабирования, а также получения информации в цифровом формате. Дополнительные функции позволяют оператору проводить выборку данных по различным параметрам как в режиме реального времени, так и с определенной периодичностью для возможности ввести web-датчики в "спящий режим". С помощью разработанной программы можно удаленно изменять или обновлять ПО распределенных web-датчиков. Приложение позволяет оператору создать свой набор правил для анализа полученной информации.

Разработка мультиагентной системы мониторинга web-датчиков, созданных на основе наносенсорики, позволяет создать широкий класс мониторинговых систем, работающих с различными датчиками (радиации, загазованности, температуры, влажности и т. д.) в режиме реального времени. Мультиагентная система мониторинга позволяет снизить стоимость каналов связи для передачи данных, а также снизить стоимости функционирования АСУ ТП вследствие удаленного управления. Полученный научный задел позволит перейти к непосредственному созданию широчайшего спектра устройств нового поколения для систем мониторинга и управления.

Список литературы

1. Галушков А. И., Голишников А. А., Прокофьев И. В., Суханов В. С. Исследование технологии изготовления интегральных магниторезистивных преобразователей для устройства регистрации магнитных полей // Оборонный комплекс — научно-техническому прогрессу России. 2007. С. 81—83.

2. Амеличев В. В., Галушков А. И., Дягилев В. В., Касаткин С. И., Муравьев А. М., Лопатин В. В., Резнев А. А., Сауров А. Н., Суханов В. С. Микроэлектронная магниторезистивная технология // Нано- и микросистемная техника. 2007. № 3. С. 22–26.

3. Волков Ю. И., Суханов А. В. Виртуальный прибор аппаратно-программного комплекса сбора и анализа данных с территориально удаленных датчиков магнитного поля с использованием среды LabVIEW // Инженерные и научные приложения на базе технологии National Instruments — 2013: Сб. тр. XII междунар. научно-практической конф., Москва 28—29 ноября 2013 г. М.: ДМК Пресс, 2013. 436 с.

A. V. Sukhanov, Graduate Student, designing engineer, I. V. Prokofiev, Senior Researcher,
 D. V. Gusev, Senior Researcher
 Scientific-Manufacturing Complex "Technological Center" MIET

MULTI-AGENT MONITORING SYSTEM OF WEB-SENSORS BASED ON NANOSENSORICS

This article shows the results of research and designing of multi-agent monitoring system of web-sensors based on nanosensorics. During this work a web-sensor construction was designed which consists of: anisotropic magneto-resistive magnetic field transducer chip and high sensitive unit detecting poisoning gas — carbon monoxide. Software for multi-monitoring system with remote access and ability to visualize, analyze and store received data was developed.

Keywords: monitoring system, sensor network, ethernet, micro-server, web-sensor, nanosensorics, remote access, magnetic field transducers, thin-film magnetoresistor, CO gas sensor

Р. А. Федоров, канд. техн. наук, нач. лаб. НПК "Технологический Центр", Москва, е-mail: R. Fedorov@tcen.ru

МИКРОСХЕМА УПРАВЛЕНИЯ МОДУЛЕМ РАДИАЦИОННОЙ ЗАЩИТЫ

Рассмотрена проблема радиационной стойкости интегральных схем в космической аппаратуре и необходимость ее защиты. Предложен вариант использования микромодуля, отслеживающего начало тиристорного эффекта. Описана специализированая микросхема управления микромодулем и ее особенности.

Ключевые слова: тиристорный эффект, радиационная стойкость, микросхема защиты

Новые технологические возможности микроэлектроники позволили качественно изменить электронную аппаратуру космического назначения, многократно увеличить ее функциональные, технические и эксплуатационные характеристики. На первый план вышла задача увеличения сроков активного существования космических аппаратов с нынешних 3-5 лет до 10-12 лет при размещении радиоэлектронной аппаратуры не в гермоконтейнере, а на открытой платформе космического аппарата. В связи с этим проблема радиационной стойкости интегральных схем (ИС) стала наиболее актуальной, так как во многих случаях именно радиационные отказы и сбои определяют срок активного существования космических аппаратов [1]. При этом по мере увеличения степени интеграции определяющими являются локальные радиационные эффекты. Происходят сбои и отказы ИС вследствие воздействия отдельных высокоэнергетичных ядерных частиц [2-4].

Анализ показывает, что для современных ИС высокой степени интеграции наиболее критичны такие радиационные эффекты, как одиночные сбои, тиристорные эффекты и кратковременные импульсы ионизационной реакции ("иголки"). Наиболее опасным является тиристорный эффект, при возникновении которого возможно выгорание как самой ИС, так и вторичного источника питания. Проведенные расчетно-экспериментальные исследования выявили повышение чувствительности КМОП ИС по мере уменьшения технологических норм [1]. Например, в КМОП ИС с проектными нормами 0,5 мкм и выше крайне редко имеет место тиристорный эффект при воздействии протонов космического пространства, тогда как в ИС с проектными нормами 0,25 мкм и ниже он практически всегда имеет место, даже при нормальной температуре.

Тиристорный эффект (тиристорное защелкивание, *latch-up*) обусловлен наличием паразитного тиристора в микросхемах на базе КМОП-структур. Определенные внешние факторы, в частности воздействие тяжелых заряженных частиц (ТЗЧ), могут приводить к отпиранию и фиксации этого тиристора в открытом состоянии, что вызывает быстрое нарастание тока потребления с последующим тепловым разрушением микросхемы.

В НПК "Технологический центр" разработана и изготовлена микросхема управления микромодулем радиационной защиты (МРЗ), в частности, от тиристорного эффекта. Микромодуль состоит из специализированной микросхемы управления, внешнего транзистора коммутации и шунта измерения тока потребления. Защищаемая микросхема или группа микросхем (ЗГМ) подключается через транзистор коммутации к источнику питания и при возникновении повышенного тока потребления, вследствие проявления тиристорного эффекта, обеспечивает ее отключение. На рис. 1 представлена рекомендуемая схема включения MP3.

При работе в автоматическом режиме МРЗ обеспечивает:

 обнаружение заданного превышения тока, потребляемого ЗГМ;

 по истечении заданного времени от момента обнаружения превышения тока включает защиту (выключает питание 3ГМ);

 по истечении заданного времени от момента включения защиты выключает ее (восстанавливает питание ЗГМ);

— если разрешена работа сторожевого таймера, MP3 отслеживает наличие импульсов на входе сторожевого таймера и при их отсутствии в течение определенного времени выключает питание ЗГМ на заданное время.

На рис. 1 $R_{\rm ИЗM}$ — низкоомный резистор, предназначенный для отслеживания уровня потребляемого нагрузкой тока; *VT1* (ключ защиты нагрузки от тиристорного



Рис. 1. Рекомендуемая схема включения МРЗ



Рис. 2. Работа компаратора, дифференциального усилителя при кратковременном скачке нагрузки

эффекта) — биполярный транзистор структуры p-n-p, R1 — резистор задания тока базы; $R_{\rm H}$, $C_{\rm H}$ — нагрузка с конденсатором фильтра; C1 — конденсатор защиты по питанию обеспечивает нормальное функционирование MP3 на время нарушения работы основного источника питания VDD; C2 — внешний времязадающий конденсатор защиты от тиристорного защелкивания, который определяет частоту тактового генератора, синхронизирующего работу схемы управления защитой от тиристорного защелкивания; C3 — внешний времязадающий конденсатор сторожевого таймера, определяющий частоту тактового генератора сторожевого таймера.

На рис. 2 представлена работа компаратора, дифференциального усилителя при кратковременном скачке нагрузки.

Предусмотрена возможность внешнего управления. Задание порога срабатывания защиты потоку проводит-

ся путем выбора необходимого значения внешнего резистора, являющегося датчиком тока. Установка задержек срабатывания защиты по току и по сторожевому таймеру осуществляется путем выбора значений емкости внешних конденсаторов, определяющих частоту соответствующих генераторов MP3.

MP3 имеет два информационных выхода типа "открытый сток", позволяющих внешним системам управления определять факты срабатывания защиты от тиристорного защелкивания и от тайм-аута сторожевого таймера.

Для проверки микросхемы после изготовления в НПК "Технологический центр" был разработан и создан контрольно-диагностический стенд на базе оборудования компании *National Instruments*. Стенд позволяет проводить автоматизированные аналоговые и цифровые измерения как в составе пластин, так и в корпусном исполнении.

В настоящее время изготовлены и исследованы экспериментальные образцы МРЗ в двух вариантах: с внешним мощным ключом и с встроенным внутренним мощным ключом. Оба варианта выполнены в корпусе типа 28LLC с размерами 6,5 × 6,5 мм. Микросхема с внешним мощным ключом изготовлена по радиационно-стойкой КМОП-технологии 1,5 мкм и прошла предварительные испытания. На данный момент микросхема используется заказчиком и успешно парировала ряд тиристорных эффектов в аппаратуре спутника, находящегося на орбите. Микросхема с внутренним мощным ключом изготовлена по КМОП-технологии 0,18 мкм в таком же корпусе. Предварительные измерения показали, что все функциональные блоки работают в соответствии с назначением. В 2014 г. планируется провести предварительные испытания микросхемы.

Список литературы

1. Чумаков А. И., Васильев А. Л., Козлов А. А., Кольцов Д. О., Криницкий А. В., Печенкин А. А., Тарараксин А. С., Яненко А. В. Прогнозирование локальных радиационных эффектов в ИС при воздействии факторов космического пространства // Микроэлектроника, 2010. Т. 39, № 2. С. 85—90.

2. **Чумаков А. И.** Действие космической радиации на ИС. М.: Радио и связь, 2004. 320 с.

3. Holmes_Siedle A., Adams L. Handbook of Radiation Effects. Oxford: Oxford university press, 1993. 479 p.

4. Messenger G. C., Ash M. S. Single Event Phenomena. N. Y.: Chapman & Hall, 1997. 368 p.

R. A. Fedorov, Head of Lab. R.Fedorov@tcen.ru Scientific-Manufacturing Complex "Technological Center" MIET

MICROCIRCUIT FOR RADIATION PROTECTION MODULE MANAGEMENT

This article describes the radiation resistance problem of integrated circuits used in space equipment and the need of space equipment protection. An option to use a micromodule for latch-up effect onset monitoring is suggested to be considered. The article also describes a dedicated micromodule management IC and its distinctive features.

Keywords: latch-up effect, radiation resistance, protection microcircuit

К. В. Платонов, мл. науч. сотр., e-mail: platonov.k.v@yandex.ru НПК "Технологический центр" МИЭТ"

МИКРОСБОРКИ С ВСТРОЕННЫМИ ПАССИВНЫМИ КОМПОНЕНТАМИ На кремниевой подложке

Проведены исследования по возможности миниатюризации annapamypы связи для частот свыше 800 МГц. Представлены способы объединения большого числа блоков в одной сборочной единице. Проведен сравнительный анализ параметров пассивных элементов, выполненных по различным технологиям.

Ключевые слова: встроенные пассивные компоненты, кремниевая подложка, микросборка, система в корпусе

Введение

В настоящее время для миниатюризации электронных устройств используют два подхода. Первый заключается в интегрировании большого числа блоков, выполняющих функции как аналоговой, так и цифровой обработки сигналов, в единую интегральную схему, изготовленную в одном технологическом процессе [1]. Аналоговые блоки, изготовленные в КМОП-процессе, имеют худшие параметры по сравнению с блоками, выполненными на AsGa или SiGe. Некоторые блоки, например высокодобротные фильтры, невозможно выполнить в таком процессе. Максимально допустимое напряжение питания уменьшается при масштабировании КМОП-технологии, тем самым ограничивая динамический диапазон системы [2]. Второй способ — интеграция интегральных схем, изготовленных в различных технологических процессах, на одной подложке [1]. По прогнозам компании Yole Developpement (рис. 1, см. четвертую сторону обложки), рынок встраиваемых тонкопленочных пассивных компонентов увеличится до 1,2 млрд в 2017 г. [3].

Миниатюризация аппаратуры

Согласно исследованию, приведенному в работе [4], пассивные компоненты статистически занимают 40 % площади печатной платы, это 30 % монтажных точек и до 90 % времени монтажа. Количественное соотношение таково — конденсаторы и резисторы в сумме занимают 73 % всех компонентов, а интегральные схемы составляют всего лишь 5 %. Следует также добавить, что львиная доля номиналов конденсаторов (44 %) лежит в диапазоне меньше 100 пФ, а 57 % номиналов резисторов занимают диапазон до 1 кОм.

Современные технологии 3D-микрокорпусирования и микросборки позволяют эффективно сократить площадь электронного узла за счет пассивных компонентов, не прибегая к повышению интеграции интегральной схемы [5]. Благодаря применению встроенных пассивных компонентов можно уменьшить размеры печатной платы в 10 раз. На рис. 2 показан пример размещения на кремниевой подложке пассивных компонентов, выполненных по тонкопленочной технологии, и интегральных схем, таких как усилитель мощности и приемопередатчик, изготовленных в различных технологических процессах [6]. В интегральной схеме линейного радиочастотного тракта WLAN с центральной частотой 2,4 ГГц, пассивные компоненты занимают около 60 % площади всего кристалла. С уменьшением технологических норм структурные блоки интегральных схем можно масштабировать, чего нельзя сказать о пассивных компонентах (в первую очередь это касается катушек индуктивности) — они начинают вносить все больший вклад в стоимость интегральной схемы [2]. Применение встроенных пассивных элементов на кремниевой подложке будет способствовать сокращению диспропорций в размерах КМОП-схем и пассивных компонентов [3]. В работе [7] приводится динамика изменения удельной емкости конденсаторов — от 25 н Φ /мм² в 2003 г. до 400 н Φ /мм² в 2007 г. В 2012 г. получены конденсаторы с удельной емкостью 550 н Φ /мм² [8].



Рис. 2. Микросборка приемопередатчика [6]



Добротность пассивных компонентов

Фазовые шумы ГУН обратно пропорциональны квадрату добротности фильтрующих LC-элементов. Добротность этих цепей ограничена элементами с минимальной добротностью. Такими элементами являются катушки индуктивности. Высокая добротность пассивных элементов позволяет получить более низкий коэффициент шума в малошумящих усилителях [2]. Однако применение супергетеродинных приемников существенно снижает требования к добротности фильтров (и, как следствие, к добротности пассивных элементов), но не решает всех проблем [9].

В частотном диапазоне 5...6 ГГц можно довести добротность катушек индуктивности, выполненных в КМОП-процессе до 20, что является пределом для данной технологии. Используя технологию МСМ-D, на алюминиевой подложке можно получить добротность около 80 на гигагерцовых частотах [2]. Катушки индуктивности на кремниевой подложке имеют результаты несколько хуже — добротность 71 для катушки номиналом 2,4 нГн на частоте 4,3 ГГц. Для сравнения, катушка индуктивности для поверхностного монтажа (типоразмер 0402) номиналом 2,4 нГн имеет добротность 50 [11].

Надежность

Австрийская компания AT & S испытала тестовые платы со встроенными и поверхностно-монтируемыми резисторами типоразмера 0402. В результате испытаний на удар, проведенных в соответствии со стандартом JEDEC JESD22-B111, были зарегистрированы отказы поверхностно-монтируемых резисторов в 94 % случаев, а в тестовых платах со встроенными пассивными компонентами — в 5 % [12].

Французская компания IPDiA провела испытания на температурную стабильность собственных конденсаторов, выполненных на кремниевой подложке и высокотемпературных X8R. Результаты приведены на рис. 3 [13].

Заключение

В результате сравнения пассивных компонентов, выполненных по различным технологиям, было показано преимущество встраиваемых пассивных компонентов, выполненных на кремниевой подложке, по целому ряду параметров: занимаемая площадь, добротность, надежность. Данные компоненты позволяют решить проблему миниатюризации аппаратуры связи и связанную с ней проблему диспропорции в размерах пассивных компонентов и активных блоков интегральных микросхем.

Список литературы

1. Li H. Y., Khoo Y. M., Khan Navas et al. High Performance Embedded RF Passive Device Process Integration // 2008 Electronic Components and Technology Conference, IEEE. 2008. P. 1709–1713.

2. Ahsan Ali, Muhammad Zafarullah, Yasar Amin. Design and Comparison of Various Passive Components of a 5GHz Wireless LAN Applications // Proc. of National Conference on Emerging Technologies 2004. P. 17–23.

3. Yole Developpement. Thin-Film IPDs // URL: http:// www.yole.fr/iso_upload/News/2012/PR_Thin-Film%20IPDs_ YOLE%20DEVELOPPEMENT_October%202012.pdf

4. **Dougherty J. P.** The NEMI Roadmap: Integrated Passives Technology and Economics // April 1. CARTS. 2003. P. 1–11.

5. **Холунин А.** 3D-интеграция — один из возможных путей опережающего развития отечественной микроэлектроники // Компоненты и технологии. 2010. № 12. С. 148—150.

6. **Bellenger S., Bunel C., Murray F.** Low profile 3D-IPD for Advanced Wafer Level Packaging // URL: http://www.ipdia. com/download.php?file=%2Fproducts%2FDevicePackagingC conference2011.pdf&cat=publications

7. **Murray F.** Silicon Based System-in-Package: a passive integration technology combined with advanced packaging and system based design tools to allow a breakthrough in miniaturization // IEEE BCTM. 10.3. 2005. P. 169–173.

8. **Bunel C., Voiron F., Tenailleau J. R.** Ultra High Density Capacitors merged with Through Silicon Vias to enhance performances. URL: http://www.ipdia.com/download.php?file= %2Fproducts%2FIPDIA_DPC2013.pdf&cat=publications

9. **Razavi B.** Challenges in Portable RF Tranceiver Design // Circuits & Devices. IEEE. 1996. P. 12–25.

10. **Wane S., Bajon D.** Full-Wave Analysis of Inhomogeneous Deep-Trench Isolation Patterning for Coupling Reduction and Q-Factor Improvement // IEEE Transaction on Microwave Theory and Techniques. 2006. P. 1–15.

11. **Murata** Manufacturing Co., Ltd. Chip Inductors (Chip Coils). 2012. P. 130.

12. **Нисан А.** Встраивание пассивных компонентов в печатные платы — альтернатива печатному монтажу // Электроника: Наука. Технология. Бизнес. 2011. № 6. С. 84—92.

13. **Bunel C., Lengignon L.** Silicon Capasitors with extremely high stability and reliability ideal for high temperature applications. URL: http://www.ipdia.com/download.php?file= %2Fproducts%2FManuscript+IPDIA+HITEC+2012.pdf&cat= publications

K. V. Platonov, Junior Researcher, Scientific-Manufacturing Complex "Technological Centre" MIET, e-mail: platonov.k.v@yandex.ru

MICRO ASSEMBLIES WITH INTEGRATED PASSIVE DEVICES ON SILICON SUBSTRATE

The research of the possibility of miniaturization of communications equipment for frequencies above 800 MHz were conducted. There are submitted the ways of integration a large number of blocks in one assembly unit. The comparative analysis of parameters of passive elements made of various technologies was conducted.

Keywords: integrated passive components, silicon substrate, micro assembly, system-in-package

Н. И. Малашевич, мл. науч. сотр., НПК "Технологический центр", e-mail: N.Malashevich@gmail.com

РАЗРАБОТКА МЕТОДИКИ ИНТЕГРАЦИИ ОЗУ В БАЗОВЫХ МАТРИЧНЫХ КРИСТАЛЛАХ КОСМИЧЕСКОГО НАЗНАЧЕНИЯ

Показана необходимость создания отечественных базовых матричных кристаллов (БМК) космического назначения с интегрированными блоками оперативного запоминающего устройства (ОЗУ). Перечислены преимущества использования микросхем указанных типов по сравнению с применением зарубежных ОЗУ, образующих на плате переходы БМК — ПЛИС/ASIC. Предложена методика интеграции блоков ОЗУ в структуру БМК. Рассмотрены основные ограничения, накладываемые конструкцией поля БМК на процесс разработки и интеграции блока ОЗУ.

Ключевые слова: БМК, ОЗУ, интеграция в конструкцию БМК

В бортовой аппаратуре космических аппаратов применяются интегральные схемы (ИС) разной номенклатуры. При этом вследствие специфичности требований к ИС космического применения и небольшого тиража наиболее целесообразно использование базовых матричных кристаллов (БМК). Важным ограничением области применения БМК с повышенными требованиями по стойкости и надежности является отсутствие внутренних блоков статической памяти.

Важным ограничением области применения БМК с повышенными требованиями по стойкости и надежности является отсутствие внутренних блоков статической памяти, удовлетворяющих указанным выше требованиям. Зарубежные БМК с встроенными блоками оперативного запоминающего устройства (ОЗУ) известны с 1980-х гг. [8—10]. Однако в России возможность интеграции ОЗУ в состав БМК возникла с появлением микроэлектронных производств с технологическим уровнем 0,25 мкм и менее.

В этих условиях отечественный БМК с интегрированными блоками ОЗУ позволит отказаться от ряда зарубежных ИС, которые не всегда могут удовлетворять требованиям отечественных стандартов. Это позволит избежать перехода БМК — ПЛИС/ASIC. За счет отсутствия перехода между микросхемами разного типа следует ожидать повышение надежности конечного изделия, улучшения динамических характеристик, снижения стоимости изделия и сроков изготовления, экономии места на плате.

В НПК "Технологический центр" разрабатывается серия БМК 5529, включающая в свой состав область для реализации оперативного запоминающего устройства и блок ОЗУ для интеграции в конструкцию БМК. В состав новой серии входят кристаллы емкостью 100 000, 200 000, 500 000 и 1 000 000 условных вентилей, выполненных по технологии КМОП на структурах "кремний-на-изоляторе" (КНИ) с технологическими нормами 0,25 мкм [1].

Разрабатываемые БМК должны содержать блоки ОЗУ и постоянное запоминающее устройство (ПЗУ), конструкция которых должна быть совместима с конструкцией поля БМК. Интеграция блока ОЗУ в структуру БМК требует соблюдения следующих условий:

- использование специальных САПР, предназначенных для работы с БМК;
- проектирование модуля памяти на основе библиотеки цифровых элементов БМК;
- учет особенностей конструкции поля БМК, которые накладывают ограничения на используемые компо-

ненты (запрет на использование/ограниченные номиналы резисторов и конденсаторов);

- для оптимального использования площади кристалла топологический размер элементарной ячейки памяти должен быть кратен топологическому размеру ячейки поля БМК;
- фиксированный топологический размер базовой ячейки поля БМК накладывает ограничение на размеры транзисторов, входящих в состав элементарной ячейки памяти;
- топология ячейки ОЗУ должна быть выполнена с учетом фиксированного расположения на кристалле шин земли и питания;
- конструкция, расположение и топология структурных блоков модуля ОЗУ должны быть выполнены с учетом особенностей прокладки трасс межсоединений и шин питания БМК;
- размер поля БМК накладывает ограничение на габаритные размеры блока ОЗУ.

Встраиваемый в БМК космического назначения модуль ОЗУ должен соответствовать следующим основным требованиям по надежности:

— диапазон рабочих температур от -60 до +120 °C;

 стойкость к влиянию накопленной дозы радиации не менее 100 крад;

— устойчивость к одиночным сбоям, вызванных воздействием отдельных ядерных частиц.

Интеграция блока ОЗУ в БМК включает последовательное выполнение следующих задач (см. рисунок):

разработка пригодной для применения в БМК ячейки памяти;

— разработка усилителей записи и считывания;

– определение объема и организации базового блока
 ОЗУ с учетом возможности построения на его основе
 ОЗУ различной информационной емкости;

 – разработка схемы блока ОЗУ на основе библиотеки цифровых элементов БМК и разработанных ячеек памяти;

— разработка топологии блока O3У;

определение оптимального расположения блока
 ОЗУ на поле БМК;

— мультиплицирование базового блока ОЗУ в целях получения модуля памяти желаемого объема.

При проектировании ячейки памяти необходимо решить задачу достижения максимального быстродействия в условиях ограниченной площади, поскольку топологи-



Пример организации матрицы ячеек для ОЗУ 4К×8: A[0..11] -адресная шина, W — команда записи, R — команда чтения, D[0..7] — шина данных

ческий размер ячейки ОЗУ должен быть кратен базовой ячейке БМК. Задача решается в несколько этапов:

 схемотехническое проектирование с учетом особенностей БМК;

моделирование;

 топологическое проектирование с учетом особенностей базовой ячейки БМК (расположение шин питания, кратность геометрических размеров ячейки памяти и базовой ячейки поля БМК);

экстракция паразитных элементов;

— моделирование с учетом результатов экстракции;
 — изменение схемотехники с учетом ограничений то-

пологии;

— изменение топологии.

При разработке сопутствующих ячейке памяти блоков усилителя записи и считывания последовательно выполняются те же процедуры. Должны учитываться требования по увеличению быстродействия, минимизации площади и тока потребления в режимах хранения, записи и считывания. Электрические схемы данных блоков, как и схема ячейки памяти, должны быть выполнены на основе библиотеки БМК и не должны содержать аналоговых компонентов. Топологические схемы должны быть совместимы с конструкцией БМК, их размер должен быть кратен размеру базовой ячейки поля.

Организация массива ячеек памяти должна быть направлена на повышение надежности ОЗУ в случае попадания отдельной ядерной частицы (ОЯЧ). Соотношение между емкостями нагрузки на разрядных шинах и шинах управляющих сигналов должно удовлетворять требованиям минимизации потребляемой мощности и увеличения быстродействия. Согласно приведенным в работе [2] данным требованию минимизации потребляемой мощности отвечает матрица ячеек памяти, удовлетворяющая соотношениям

$$N_{\rm ct} \leqslant N_{\rm M}, \quad N_{\rm cnuu} = 2^{A - N_{\rm M}},$$

где A = M + N — разрядность адресной шины, M — разрядность адреса строк накопителя; N — разрядность адреса столбцов; $N_{\text{слш}}$ — число строк; $N_{\text{ст}}$ — число столбцов; $N_{\text{м}}$ — верхняя граница диапазона числа строк накопителя, в котором $C_{\text{слш}} \ll C_{\text{шл}}$.

копителя, в котором $C_{cли1} \ll C_{und}$. Для соотношения $C_{cли0}/C_{und0} = 2$, где $C_{cли0} -$ емкость словарной шины одной ячейки памяти, $C_{und0} -$ емкость шин данных одной ячейки памяти (6-транзисторная ячейка памяти; индекс 0 означает емкость для одной ячейки) $N_{\rm M} =$ А-5. Для ячейки, разработанной в НПК "Технологический центр" [3, 4], справедливо $C_{cли10}/C_{und0} = 1/2,5$ и $N_{\rm M} =$ А-3.

Разработка схемы ОЗУ выполняется на основе библиотеки цифровых элементов БМК с учетом особенностей применяемой ячейки памяти. Длительность фронта и уровни управляющих сигналов должны быть достаточными для обеспечения минимального времени обращения к массиву ячеек памяти. Должна быть решена задача быстрой перезарядки шин с большой нагрузочной емкостью при условии ограниченной нагрузочной способности элементов библиотеки БМК. Следствием этого являются разбиение массива ячеек памяти буферными элементами, предназначенными для усиления сигнала на сквозных шинах, и увеличение площади схемы ОЗУ на кристалле. Число буферных элементов и варианты разбиения могут быть определены исходя из особенностей библиотеки БМК, а также путем моделирования. На рисунке приведен пример организации матрицы ячеек памяти для ОЗУ 4К×8.

Для исключения ошибок в нескольких битах одного слова данных в случае попадания ОЯЧ в матрице отдельно сгруппированы все нулевые биты слов по всем адресам, отдельно первые биты, вторые и т. д. В худшем случае при таком расположении данных ОЯЧ может внести лишь одиночные ошибки в отдельные слова, и данные могут быть восстановлены с помощью средств кодирования. Перемешивание разных разрядов по разным адресам также может минимизировать число ошибок в пределах одного слова данных, однако усложнит топологию.

Матрица ячеек памяти разбита пополам схемами раздачи данных и усилителями чтения. Таким образом уменьшается длина разрядных шин, их нагрузочная емкость. Столбцы ячеек памяти чередуются с буферными элементами, что обусловлено ограниченной нагрузочной способностью элементов библиотеки БМК. Применение таких вставок ведет к ухудшению быстродействия схемы ОЗУ из-за увеличения времени обращения к данным по мере роста номера разряда в слове. В то же время пространственное разнесение соседних разрядов слова данных за счет разбиения матрицы столбцами буферов способствует минимизации ущерба от ОЯЧ. Такое решение может быть оправдано космическим назначением БМК, поскольку в нем при всей важности быстродействия приоритетом является надежность конечного устройства.

Топология блока ОЗУ должна быть выполнена с учетом ограничений, накладываемых конструкцией поля БМК и его габаритными размерами. Необходимо учитывать расположение шин земли и питания, а также трассировочных дорожек.

Расположение блока ОЗУ на поле БМК должно быть выполнено с учетом ограничений, накладываемых размером кристалла. Оно должно обеспечивать возможность мультиплицирования блоков памяти, применения встроенной схемы криптографической защиты данных, а также предоставлять равномерный доступ к памяти прочих схем, расположенных на кристалле.

Максимальный размер блока ОЗУ должен удовлетворять следующему условию:

$$S_{O3Y} \leq S_{EMK},$$

где S_{O3У} — площадь, занимаемая блоком O3У; S_{БМК} — площадь доступного для размещения поля БМК.

Чаще всего в состав схем ОЗУ входят дешифраторы адреса, блок управления режимами работы ОЗУ, блок ввода/вывода данных и матрица ячеек памяти, которая может включать усилители считывания и записи, а также буферные элементы на шинах большой протяженности. Поскольку общее число базовых ячеек в составе дешифраторов, блока ввода/вывода и блока управления значительно меньше числа базовых ячеек в матрице памяти, максимальный размер блока ОЗУ определяется формулой

$$\begin{split} S_{\text{O3V}} &= N_{\text{O3V}} S_{\text{6s}} \approx \\ &\approx S_{\text{6s}} (KWR_{\text{sm}} + R_{\text{sam}} N_{\text{cr}} + R_{\text{yr}} N_{\text{cr}} + N_{\text{5y}\Phi}), \end{split}$$

где N_{O3Y} — общее число базовых ячеек в схеме O3У; $S_{6\pi}$ — площадь базовой ячейки поля; K — разрядность слов; W — число слов; $N_{\rm БУФ}$ — число базовых ячеек в составе буферных элементов; $R_{{}_{\rm Я\Pi}} = S_{{}_{\rm Я\Pi}}/S_{6\pi}$ — соотношение площадей ячейки памяти и базовой ячейки; $R_{{}_{\rm 3an}} = S_{{}_{\rm 3an}}/S_{6\pi}$ — соотношение площадей записи и базовой ячейки; $R_{\rm чT} = S_{\rm чT}/S_{\rm 68}$ — соотношение площадей усилителя чтения и базовой ячейки.

Аттестованный БМК космического назначения с встроенным блоком ОЗУ позволит реализовать широкий спектр специализированных микросхем при минимизации затрат на проведение испытаний и освоение новых типов микросхем.

Список литературы

1. **Малашевич Н. И.** Реализация ячейки ОЗУ в составе КМОП БМК // Известия высших учебных заведений. Электроника. 2013. № 2 (100). С. 89—90.

2. Гармаш А. А. Маломощные цифровые сложнофункциональные блоки КМОП СБИС: дисс. ... канд. техн. наук: 05.13.05. М., 2010. 148 с.

3. Федоров Р. А., Малашевич Н. И. Ячейка ОЗУ, устойчивая к воздействию внешних факторов // Оборонный комплекс — научно-техническому прогрессу России. 2011. № 4. С. 29—33.

4. Ячейка памяти статического оперативного запоминающего устройства. Пат. 2507611 Рос. Федерация: МПК G11C 11/40 (2006.01) / Р. А. Федоров, Н. И. Малашевич; патентообладатель — федеральное государственное бюджетное учреждение "Научно-производственный комплекс "Технологический центр" МИЭТ". № 2012140218/08; заявл. 20.09.2012; опубл. 20.02.2014, Бюл. № 5. 8 с.

N. I. Malashevich, Junior Researcher,

Scientific-Manufacturing Complex "Technological Center" MIET

DEVELOPMENT OF METHODS FOR INTEGRATION OF RAM IN THE GATE ARRAY FOR SPACE APPLICATION

The article shows necessity of creating a domestic space purposes the gate array with integrated blocks of random access memory (RAM). It's shown the advantage of using these types of chips compared to the use of foreign RAM. Author proposed a technique of integration RAM block in the gate array structure. The article shows basic constraints imposed by construction of the gate array field on the design and integration of RAM block.

Keywords: gate array, SRAM, memory cell, integration of RAM in the gate array

УДК 681.586.35

Д. В. Гусев, ст. науч. сотр., Н. Л. Данилова, ст. науч. сотр., Н. С. Землянников, мл. науч. сотр., e-mail: N. Zemliannikov@tcen.ru, В. С. Суханов, нач. лаб., НПК "Технологический центр" МИЭТ

МНОГОКАНАЛЬНЫЕ ТЕНЗОРЕЗИСТИВНЫЕ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ ДАВЛЕНИЯ

В основе многих современных средств измерений использованы устройства на основе МЭМС, изготовленные по различным технологиям. В данной работе рассмотрена конструкция многоканального сканера давления для измерения давления на поверхности моделей летательных аппаратов при проведении испытаний в аэродинамической трубе. Предложенное устройство основано на кремниевых тензорезистивных преобразователях давления.

Ключевые слова: тензорезистивный преобразователь давления, многоканальный сканер давления

Развитие робототехники, медицины и авиации диктует все новые требования к преобразователям давления и их применению. Многоканальные преобразователи давления активно используют при исследовании аэродинамических моделей летательных аппаратов и моделей крупных сооружений.

К измерительной аппаратуре при проведении аэродинамических исследований предъявляется ряд требований, основными из которых являются: многоточечность измерений, единообразие измерений в каждой точке, высокая точность, малые габаритно-массовые параметры и энергопотребление при минимизации количества соединительных проводов.

В НПК "Технологический центр" был разработан малогабаритный 16-канальный сканер давления с цифровым выходом. Основой сканера являются 16 кремниевых тензорезистивных чувствительных элементов размером $2,5 \times 2,5$ мм с высокой стабильностью выходных параметров, размещенные в корпусе сканера с размерами $57 \times 21 \times 9$ мм.

При малых размерах кристалла чувствительного элемента давления применение традиционного анизотропного травления для формирования тонкой части мембраны и концентратора механических напряжений затруднено. Для решения этой проблемы был проведен эксперимент по применению глубокого реактивного ионного травления кремния (DRIE, Bosch process) для формирования тонкой части мембраны.

В качестве критерия оценки был выбран показатель чувствительности конструкции кристалла [1], который определяется как $\Pi_{\kappa,\mathrm{u}}^* = 0,128\pi_{44}(a_\mathrm{M}^2 - a_\mathrm{II}^2)(1-\mu)$, где π_{44} — главный пьезорезистивный коэффициент для тензорезисторов *p*-типа проводимости в кремнии ориентации (001); μ — коэффициент Пуассона; a_M — расстояние между тензорезисторами у края рамки кристалла; a_II — расстояние между тензорезисторами у края рамки кристалла; a_II — выходной сигнал при определенном давлении и напряжении питания для конкретной топологии кристалла.

Проведенные исследования при атмосферном давлении показали, что при близкой толщине мембраны кристаллы, выполненные с применением глубокого реактивного ионного травления (DRIE), имеют большее значение показателя чувствительности (рис. 1), чем кристаллы с мембраной, изготовленной с помощью анизотропного жидкостного химического травления (АЖХТ).

Полученные результаты показывают рост чувствительности за счет увеличения площади тонкой части



Рис. 1. Экспериментальные значения показателя чувствительности для разных вариантов чувствительного элемента давления: 1 — для мембраны, выполненной с помощью АЖХТ; 2 — для мембраны, выполненной с помощью DRIE Bosch process



Рис. 2. Общий вид кристалла чувствительного элемента давления:

вариант 1 — мембрана, выполненная с помощью АЖХТ; вариант 2 — мембрана, выполненная с помощью Bosch process



Рис. 3. Сечение кристалла чувствительного элемента давления с утоненным слоем диэлектрика на лицевой стороне мембраны

мембраны. Это обусловлено увеличением крутизны стенок при использовании травления Bosch process [2]. Таким образом, возможно увеличить площадь тонкой части мембраны и расстояние между тензорезисторами при сохранении габаритных размеров кристалла чувствительного элемента давления. Общий вид кристалла показан на рис. 2.

В ходе исследований было установлено, что нелинейность преобразовательной характеристики чувствительного элемента давления заметно снижается при утонении слоя диэлектрика с лицевой стороны тонкой мембраны при толщине мембраны менее 30 мкм. Этого эффекта можно достигнуть, удалив в окне над мембраной прежний слой диэлектрика *d* и сформировав на его месте новый слой заданной толщины *d*₁ (рис. 3).

Слой диэлектрика необходимой толщины над мембраной формируется с помощью термического окисления кремния. При этом устраняется провисание мембраны и обеспечивается большая временная стабильность выходных параметров.

На основе описанных выше кристаллов изготовляется многоканальный цифровой сканер параметров давления газодинамических потоков (рис. 4). Данное устройство рассчитано на 16 независимых каналов регистрации давления из диапазона 0...10 кПа, 0...40 кПа, 0...100 кПа в диапазоне температур — 20...65 °С. В основании корпуса сканера предусмотрен штуцер (семнадцатый), через который можно подавать давление под крышку корпуса. Тогда при условии герметичного соединения основания и крышки проводят измерения относительно давления, подаваемого под крышку.

Для передачи данных с чувствительных элементов давления используется интерфейс RS-232. Преобразование аналогового напряжения с каждого чувствительного элемента давления сканера в цифровой код осуществляется средствами АЦП, который является составной частью микроконтроллера. Микроконтроллер организует временну́ю диаграмму работы изделия, выполняя переключения мультиплексора, управление АЦП и выдачу последовательного кода по последовательному каналу передачи данных на драйвер физического уровня интерфейса RS-232. Данные передаются со скоростью 115 200 бит/с, форматом 8-битного символа, одним стартовым и одним стоповым битами и без бита проверки четности. Для улучшения качества оцифровки аналогового сигна-



Рис. 4. Фотография многоканального сканера давления:

a — общий вид многоканального сканера давления; δ — смонтированный и разваренный чувствительный элемент давления в корпусе сканера







Рис. 6. Гистограмма распределения значений коэффициента нелинейности по каналам сканера

ла применено временное разделение процессов измерения и передачи последовательных данных. Экспериментально установлено, что отсутствие синхронизации между этими процессами порождает значительное увеличение уровня шумов.

Оцифрованный сигнал отображается в условных единицах младшего разряда, что позволяет вычислить основные характеристики каналов сканера (нелинейность, чувствительность) [3]. Распределение выходных сигналов по каналам сканера показано на рис. 5.

Нелинейность выходного сигнала каналов сканера не превышает 0,7 % верхнего предела измерения (ВПИ) давления, гистограмма распределения приведена на рис. 6.

Разработанная конструкция показала воспроизводимые результаты измерений и выходные характеристики, соответствующие лучшим образцам мирового уровня. Конструкция сканера и последовательный цифровой интерфейс позволяют увеличивать число каналов измерения, соединяя несколько сканеров в единый модуль.

Список литературы

1. Игнатьева Е. В., Михайлов Ю. А., Тимошенков С. П. О показателе чувствительности конструкции кремниевых тензопреобразователей давления // Датчики и системы. 2008. № 10. С. 35—37.

2. Виноградов А. И., Зарянкин Н. М., Прокопьев Е. П., Тимошенков С. П., Михайлов Ю. А. Оптимизация параметров процесса глубокого плазмохимического травления кремния для элементов МЭМС // Известия вузов. Электроника. 2010. № 2 (82). С. 3–9.

3. Игнатьева Е. В., Михайлов Ю. А., Панков В. В. Влияние конструкции мембраны на параметры выходной характеристики кремниевого тензопреобразователя давления // Датчики и системы. 2009. № 6. С. 51—54.

D. V. Gusev, Senior Researcher, N. L. Danilova, Senior Researcher, N. S. Zemlyannikov, Junior Researcher, V. S. Sukhanov, Head of Lab.

"Technological Centre"

e-mail: N.Zemliannikov@tcen.ru

MULTICHANNEL TENSORESISTIVE PRESSURE TRANSDUCERS

Most of modern measuring instruments are based on MEMS produced by various techniques. This article describes construction of multichannel pressure scanner for measuring pressure on the aircraft surface during tests carrying out in the wind tunnel. Described device is based on silicon tensoresistive pressure transducers.

Keywords: tensoresistive pressure transducer, multichannel pressure scanner

Система на кристалле Sistems on Chip

УДК 004.9

С. В. Беляев, мл. науч. сотр., e-mail: s.belyaev@tcen.ru, П. А. Шаманаев, мл. науч. сотр., аспирант, С. В. Щербаков, мл. науч. сотр., аспирант, НПК "Технологический центр"

ПРОГРАММНЫЙ МОДУЛЬ КОНФИГУРИРОВАНИЯ СНК

Представлен краткий обзор возможных путей развития в области разработки системы на кристалле (СнК). Обоснован выбор одной из реализации. Описан программный модуль для генерации кода конфигурирования блоков СнК выбранной реализации. Изменение кода определяет один из возможных вариантов применения СнК. Разработанный программный модуль позволяет проверять записанные в конфигурационную память данные.

Ключевые слова: аналогово-цифровые БИС типа "система на кристалле", интегрированные микросистемы, обработка и преобразование сигналов

В настоящее время существуют два основных подхода к проектированию современных систем сбора и обработки данных с преобразователей физических величин. Первый подход требует обоснованного выбора элементной базы, схемотехнических решений и конструкции печатной платы. Для второго подхода необходимо наличие высокоинтегрированных компонентов с уникальными характеристиками. БИС типа "система на кристалле" (СнК) с функцией обработки информации с преобразователей физических величин различного типа должна иметь в своем составе не только вычислительное или управляющее ядро, но и интегральные фильтры, операционные и инструментальные усилители, цифровые и аналоговые мультиплексоры, устройства выборки и хранения, источники опорного напряжения, программируемые усилители, аналого-цифровые преобразователи, микроконтроллеры и т. д.

Разработанное схемотехническое решение для построения СнК представлено на рис. 1.

В соответствии с разработанным схемотехническим решением была создана топология, представленная на рис. 2 (см. четвертую сторону обложки).

Как видно на рис. 1 и 2, цифровая часть состоит из двух одинаковых блоков: блока изменяемой конфигурации и блока управления и контроля. А также в состав системы включены цифровое 8-разрядное ядро, анало-



Рис. 1. Разработанное схемотехническое решение для построения СнК

– НАНО- И МИКРОСИСТЕМНАЯ ТЕХНИКА, № 6, 2014 –

говая часть, блоки связи между цифровой и аналоговой частью и интерфейсный блок для конфигурирования всей системы.

Для корректной работы необходимо правильно сконфигурировать схему. В случае некорректной работы существует возможность провести конфигурирование схемы снова.

Программный конфигурационный модуль создавался для запуска под операционной системой Windows XP и более поздних версий. При его разработке был использован язык программирования C#, который позволяет создавать как сам код программы, так и графические элементы [1].

Инструментальный уснатель	00001000	011	LDBD	UDB1
Инструнентальный уснантель с выходным бубером Контаратор	00000100	VR	Correct(12)	Curren (2.7)
Ko-maperip! OV1	00100000	092	Cervel (0.15)	- DECEMBER OF
OV1 + notropines.	00001000	093	Ceres (IS.0)	mcn
OV1 -OV0- meropines	00000071	Uef1	[] mon	i mcn
OV1-OV3-OV4 - notropartens		094		
042-044	_			
042 041 = 042	Crep	-	Jaans	Npownars.
] OV1 -OV0 - DV0 - DV0				
18030 320000 48000 53000 2400/	VA. 7101CC			

Рис. 3. Пример диалогового окна для программирования СнК

Запуск программного модуля про-

исходит в несколько этапов. Так как запуск предполагается только под операционными системами Windows, были использованы особенности данных операционных систем для упрощения настройки соединения с аппаратурой [2]. Сначала проводится поиск подключенного устройства по его уникальным pid и vin номерам в реестре операционной системы [3]. Если в системе не найдено такое устройство, то будет предложено ввести порт, к которому присоединено нужное устройство вручную. Если же устройство, соответствующее заданным параметрам, найдено, то ему отправляется послание определенного вида, на которое устройство должно ответить. При неверном ответе (или отсутствии ответа) будет предложено выбрать устройство самостоятельно. Таким образом, сам процесс удачного подключения программного модуля к СнК невидим для пользователя. Какие-либо действия предполагаются только в случае ошибки при соединении или в ходе эхо-запроса.

В состоянии, когда соединение установлено, становятся доступны основные функции данного программного модуля, такие как генерация данных настройки СнК по информации, вводимой пользователем, запись данных в конфигурационную память, чтение текущего значения из конфигурационной памяти, стирание конфигурационной памяти.

Пользователю предлагается выбрать один из вариантов использования СнК. В зависимости от выбранного варианта становятся доступны определенные параметры. Например, если предполагается использовать операционный усилитель OV1, то возможно установить только допустимое значение коэффициента усиления. Если же нужно настроить блоки СнК для работы в режиме инструментального усилителя, то становятся доступными параметры всех задействованных при данном режиме блоков.

Для настройки всегда доступны блоки UDB0 и UDB1 (см. рис. 1). Из этих блоков можно построить ограниченный набор цифровых схем, например различные счетчики. При выборе различных подключаемых блоков меняется зашиваемый в память код. Пример диалогового окна с возможными вариантами конфигурации представлен на рис. 3.

Следующим этапом работы, когда данные для записи в конфигурационную память готовы, является работа непосредственно с самой памятью. Сначала выполняется очистка памяти. Это необходимо для того, чтобы исключить возможные ошибки при записи пакета данных длиной меньше, чем был записан при предыдущей настройке. Удостовериться, что память пуста, позволяет функция чтения памяти. После этого осуществляется запись данных в память. При этом в поля формы выводятся данные, которые будут записаны, а после записи — и данные, которые записались в память. То есть после записи в память происходит чтение записанных данных. Одновременно с этим программный модуль сравнивает записанные и прочитанные данные, и в случае их расхождения выводится уведомление.

Список литературы

1. **Pro C# 5.0** and the .NET 4.5 Framework, Andrew Troelsen, Apress, 2012.

 Побегайло А. П. Системное программирование в Windows. СПб.: БХВ, 2006.
 USB Complete: The Developer's Guide, Jan Axelson,

3. **USB** Complete: The Developer's Guide, Jan Axelson, Lakeview Research LLC, 2009.

S. V. Belyaev, Junior Researcher, P. A. Shamanaev, Graduate Student, S. V. Shcherbakov, Graduate Student, Scientific-Manufacturing Complex "Technological Centre" MIET

SOFTWARE MODULE FOR CONFIGURATION OF SoC

The article presents a brief overview of possible ways of development in the field of system-on-chip (SoC). The choice of one of implementation. Describes a software module configured to generate code blocks selected SoC implementation. Change the code defines one possible application SoC. Developed software module allows you to check the configuration stored in the memory data.

Keywords: analog-digital LSI type "system on chip", integrated micro, processing and conversion of signals

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

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

Сдано в набор 18.04.2014. Подписано в печать 24.05.2014. Формат 60×88 1/8. Заказ МС614. Цена договорная

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