



НАНО- И МИКРОСИСТЕМНАЯ ТЕХНИКА

ISSN 1813-8586

Том 20. № 9. 2018

- Нанотехнологии
- Зондовая микроскопия
- Микромашины и наносистемы
- Молекулярная электроника
- Биоактивные нанотехнологии
- Элементы датчиков и биочипы
- Микроэлектромеханические системы
- Микрооптоэлектромеханические системы
- Биомикроэлектромеханические системы

NANO- and MICROSYSTEMS
TECHNOLOGY

Vol. 20, No. 9, 2018

The articles are published
in Russian and English

Рисунки к статье А. А. Дедковой, В. Ю. Киреева, Н. С. Мазуркина
«АНАЛИЗ ФЕРРОМАГНИТНЫХ ПЛЕНОК С ПОМОЩЬЮ СИСТЕМЫ ИССЛЕДОВАНИЯ МАГНИТООПТИЧЕСКОГО ЭФФЕКТА КЕРРА И СПЕКТРАЛЬНОГО ЭЛЛИПСОМЕТРА»

A. A. Dedkova, V. Yu. Kireev, N. N. Mazurkin

«ANALYSIS OF THE PARAMETERS OF THE FERROMAGNETIC FILMS BY MEANS OF THE SYSTEM FOR RESEARCH OF THE MAGNETO-OPTICAL EFFECT OF KERR AND A SPECTRAL ELLIPSOMETER»

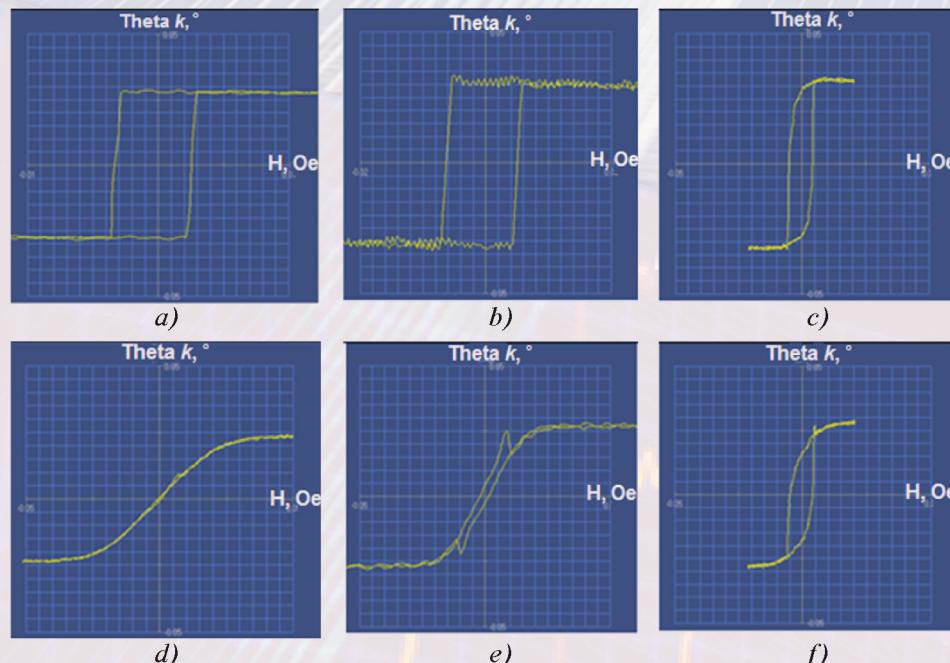


Рис. 3. Петли перемагничивания образцов пленки $\text{Fe}_{10}\text{Ni}_{74}\text{Co}_{16}$ вдоль направления оси легкого намагничивания (ОЛН) при угле $\alpha = 35^\circ$ (а, б, с) и кривые намагничивания вдоль направления оси трудного намагничивания (ОТН) при угле $\alpha = 125^\circ$ (д, е, ф), полученные в системе BH-PI7892-MI:
 а, д – образцы пленки после осаждения; б, е – образцы пленки после первого отжига при $T_1 = 400^\circ\text{C}$;
 с, ф – образцы пленки после второго отжига при $T_2 = 600^\circ\text{C}$

Fig. 3. Loops of magnetization reversal of the samples of $\text{Fe}_{10}\text{Ni}_{74}\text{Co}_{16}$ film along the direction of the axis of easy magnetization (AEM) at angle $\alpha = 35^\circ$ (a, b, c) and the curves of magnetization along the direction of hard magnetization (AHM) at angle $\alpha = 125^\circ$ (d, e, f), obtained in BH-PI7892-MI system:
 a, d – samples of the film after the deposition; b, e – samples of the film after the first annealing at $T_1 = 400^\circ\text{C}$;
 c, f – samples of the film after the second annealing at $T_2 = 600^\circ\text{C}$

Рис. 4. Оптическая схема спектрального фазового эллипсометра Auto SE:

образец – пленка $\text{Fe}_{10}\text{Ni}_{74}\text{Co}_{16}$; \mathbf{n} – нормаль к поверхности пленки; $\beta = 70^\circ$ – угол падения светового пучка на поверхность пленки;
 1 – калибровочные колеса; 2 – оптические блоки;
 3 – УФ фильтр; 4 – светодиод для освещения образца;
 5 – ПЗС камера (камера на основе прибора со связанным зарядом); 6 – затвор; 7 – выбор щели;
 8 – автоматизированная апертура; 9 – спектрометр;
 10 – голубой светодиод; 11 – галогеновая лампа

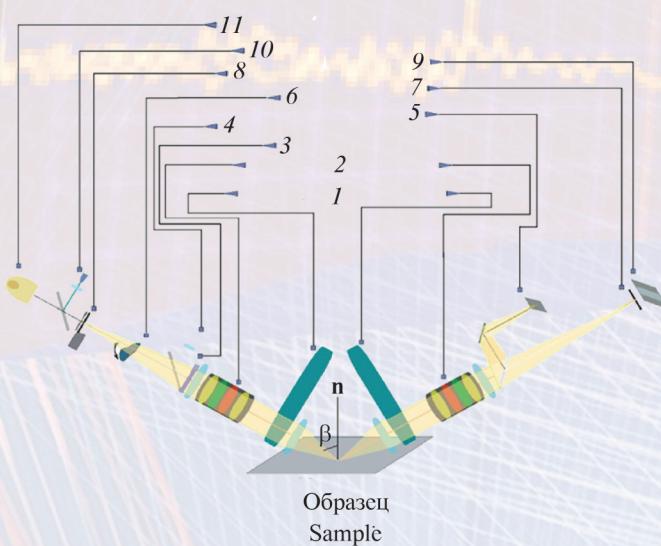


Fig. 4. Optical circuit of Auto SE spectral phase ellipsometer: sample – $\text{Fe}_{10}\text{Ni}_{74}\text{Co}_{16}$ film;
 \mathbf{n} – normal to the surface of the film;
 $\beta = 70^\circ$ – angle of incidence of the light beam on the surface of the film; 1 – calibration wheels;
 2 – optical units; 3 – UV filter; 4 – white LED for sample illumination; 5 – CCD(charge coupled device) camera; 6 – shutter; 7 – slit selection; 8 – automated pinhole; 9 – spectrometer;
 10 – blue LED; 11 – halogen lamp

НАНО- И МИКРОСИСТЕМНАЯ ТЕХНИКА

Том 20. № 9 ◆ 2018

ЕЖЕМЕСЯЧНЫЙ МЕЖДИСЦИПЛИНАРНЫЙ ТЕОРЕТИЧЕСКИЙ И ПРИКЛАДНОЙ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ

Журнал включен в международные базы данных на платформе Web of Science: Chemical Abstracts Service (CAS), которая входит в Medline, и Russian Science Citation Index (RSCI).

Журнал индексируется в системе Российского индекса научного цитирования (РИНЦ) и включен в международную базу INSPEC.

Журнал включен в Перечень международных реферируемых баз данных по научному направлению 02.00.00 химические науки и в Перечень научных и научно-технических изданий ВАК России по научным направлениям: 01.04.00 физика, 05.27.00 электроника.

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

Статьи имеют DOI и печатаются в журнале на русском и английском языках

ISSN 1813-8586 DOI: 10.17587/issn1813-8586

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. Б.], д.ф.-м.н., проф., чл.-кор. РАН

Асеев А. Л., д.ф.-м.н., проф., акад. РАН

Грибов Б. Г., д.х.н., чл.-кор. РАН

Ковальчук М. В., д.ф.-м.н., проф., чл.-кор. РАН

Кульчин Ю. Н., д.ф.-м.н., проф., акад. РАН

Лабунов В. А., д.т.н., проф., акад. НАНБ (Беларусь)

Рыжий В. И., д.ф.-м.н., проф., чл.-кор. РАН

Сауров А. Н., д.т.н., проф., акад. РАН

Сигов А. С., д.ф.-м.н., проф., акад. РАН

Чаплыгин Ю. А., д.т.н., проф., акад. РАН

Шевченко В. Я., д.х.н., проф., акад. РАН

Редакционная коллегия:

Абрамов И. И., д.ф.-м.н., проф. (Беларусь)

Андреев А., к.ф.-м.н. (Великобритания)

Астахов М. В., д.х.н., проф.

Бакланов М. Р., д.х.н., проф. (Китай)

Басаев А. С., к.ф.-м.н.

Викулин В. В., к.х.н., д.т.н., проф.

Горнев Е. С., д.т.н., проф.

Кальнов В. А., к.т.н.

Карякин А. А., д.х.н., проф.

Кузнецов В. И., д.т.н. (Нидерланды)

Леонович Г. И., д.т.н., проф.

Панин Г. Н., к.ф.-м.н., проф. (Южная Корея)

Панич А. Е., д.т.н., проф.

Пожела К., д.ф.-м.н. (Литва)

Рыжий М. В., д.т.н., проф. (Япония)

Сантос Э. Х. П., PhD, Ful. Prof. (Бразилия)

Сингх К., к.т.н. (Индия)

Телец В. А., д.т.н., проф.

Тимошенков С. П., д.т.н.

Хабибуллин Р. А., к.ф.-м.н.

Шашкин В. И., д.ф.-м.н., проф.

Шубарев В. А., д.т.н., проф.

Редакция:

Антонов Б. И. (директор изд-ва)

Лысенко А. В. (отв. секретарь)

Чугунова А. В.

Фокин В. А., к.х.н. (ред. перевода)

Щетинкин Д. А. (сайт)

СОДЕРЖАНИЕ

Издается с 1999 г.

НАНОТЕХНОЛОГИИ И ЗОНДОВАЯ МИКРОСКОПИЯ

Дудин А. А., Орлов А. П., Зенова Е. В., Тагаченков А. М. Методика подготовки одиночных нанотрубок для исследования их электрических характеристик 515

МОДЕЛИРОВАНИЕ И КОНСТРУИРОВАНИЕ МНСТ

Дедкова А. А., Киреев В. Ю., Мазуркин Н. С. Анализ ферромагнитных пленок с помощью системы исследования магнитооптического эффекта Керра и спектрального эллипсометра 521

МАТЕРИАЛОВЕДЧЕСКИЕ И ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ МНСТ

Лапин Д. Г., Овчинников И. С., Пахомов С. В. Ионно-стимулированное распыление поверхности поликристаллической меди высокогенергетическими ионами галлия 528

Пауткин В. Е., Абдуллин Ф. А., Мишанин А. Е. Исследование стенок вертикальных кремниевых структур, сформированных методами глубокого Bosch-травления 535

Васильев В. Ю. Технологии получения тонких пленок нитрида кремния для микроэлектроники и микросистемной техники. Часть 3. Плазмоактивированные процессы в проточных реакторах 542

ЭЛЕМЕНТЫ МНСТ

Брехов К. А. Напряженность электрического поля в планарном конденсаторе на основе тонкой сегнетоэлектрической пленки BaSrTiO₃ 555

Александров П. А., Жук В. И., Литвинов В. Л. О применении транзисторной квадратной трехстроченной матрицы для резервирования цифровых интегральных схем при их облучении 561

Аннотации и статьи на русском и английском языках доступны на сайте журнала (<http://microsystems.ru>; <http://novtex.ru/nmst/>) в разделе "Архив статей с 1999 г.".

ПОДПИСКА:

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

Учредитель:

Издательство "Новые технологии"

NANO- and MICROSYSTEMS TECHNOLOGY

(Title "NANO- I MIKROSISTEMNAYA TEKHNIKA")

ISSN 1813-8586 DOI: 10.17587/issn1813-8586

Vol. 20
No. 9
2018

CHIEF EDITOR

Maltsev P. P., Dr. Sci. (Tech.), Prof.

DEPUTY CHIEF EDITOR

Luchinin V. V., Dr. Sci. (Tech.), Prof.

DEPUTY CHIEF EDITOR

Shur M. S., Dr. Sci. (Phys.-Math.), Prof. (USA)

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., Acad. RAS
 Gribov B. G., Dr. Sci. (Chem.), Cor.-Mem. RAS
 Kovalchuk M. V., Dr. Sci. (Phys.-Math.), Prof., Cor.-Mem. RAS
 Kuljchin Yu. N., Dr. Sci. (Phys.-Math.), Prof., Acad. RAS
 Labunov V. A. (Belorussia), Sci. (Tech.), Acad. NASB
 Ryzhii V. I., Dr. Sci. (Phys.-Math.), Prof., Cor.-Mem. RAS
 Saurov A. N., Dr. Sci. (Tech.), Prof., Acad. 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.
 Astahov M. V., Dr. Sci. (Chem.), Prof.
 Baklanov M. R., Dr. Sci. (Chem.), Prof. (China)
 Basaev A. S., Cand. Sci. (Phys.-Math.)
 Gornev E. S., Dr. Sci. (Tech.), Prof.
 Kalnov V. A., Cand. Sci. (Tech.)
 Karjakin A. A., Dr. Sci. (Chem.), Prof.
 Khabibullin R. A., Cand. Sci. (Phys.-Math.)
 Kuznetsov V. I., Dr. Sci. (Tech.) (Netherlands)
 Leonovich G. I., Dr. Sci. (Tech.), Prof.
 Panich A. E., Dr. Sci. (Tech.), Prof.
 Panin G. N., PhD, Prof. (South Korea)
 Pozhela K. (Lithuania), Dr. Sci. (Phys.-Math.)
 Ryzhii M. V., (Japan), Dr. Eng., Prof.
 Santos E. J. P., PhD, Prof. (Brasil)
 Shubarev V. A., Dr. Sci. (Tech.), Prof.
 Shashkin V. I., Dr. Sci. (Phys.-Math.), Prof.
 Singh K., PhD (India)
 Telets V. A., Dr. Sci. (Tech.), Prof.
 Timoshenkov S. P., Dr. Sci. (Tech.)
 Vikulin V. V., Cand. Chem. Sci., Dr. Sci. (Tech.), Prof.

Editorial staff:

Antonov B. I. (Director Publ.)
 Lysenko A. V. (Executive secretary)
 Chugunova A. V.
 Fokin V. A., Cand. Sci. (Chem.)
 Shchetinkin D. A. (site)

The Journal is included in the international databases of the chemical sciences — Chemical Abstracts Service (CAS) and of the engineering sciences — INSPEC, and it is also indexed in the Russian Science Citation Index (RSCI) based on the Web of Science platform. The Journal is included in the Russian System of Science Citation Index and the List of Journals of the Higher Attestation Commission of Russia. Its articles have DOI and are printed in the Journal in Russian and English languages. The Journal is published under the scientific-methodical guidance of the Branch of Nanotechnologies and Information Technologies of the Russian Academy of Sciences.

CONTENTS

NANOTECHNOLOGY AND SCANNING PROBE MICROSCOPY

- Dudin A. A., Orlov A. P., Zenova E. V., Tagachenkov A. M. Methods for Preparation of Single Nanotubes for Research of Their Electric Characteristics 518

MODELLING AND DESIGNING OF MNST

- Dedkova A. A., Kireev V. Yu., Mazurkin N. N. Analysis of the Parameters of the Ferromagnetic Films by Means of the System for Research of the Magneto-optical Effect of Kerr and a Spectral Ellipsometer 525

SCIENCE OF MATERIALS AND TECHNOLOGICAL BASICS OF MNST

- Lapin D. G., Ovchinnikov I. S., Pahomov S. V. Ion-Stimulated Sputtering of the Surface of the Polycrystalline Copper by High-Energy Ions of Gallium 532

- Pautkin V. E., Abdullin F. A., Mishanin A. E. Investigation of the Walls of the Vertical Silicon Structures Formed by the Methods of Deep Bosch Process 539

- Vasilyev V. Yu. Silicon Nitride Thin Film Technologies for Microelectronics and Microsystem Technologies. Part 3. Plasma Activated Processes in the Flow Reactors 549

MICRO- AND NANOSYSTEM TECHNIQUE ELEMENTS

- Brekhot K. A. Electric Field Intensity in a Planar Capacitor Based on Thin BaSrTiO₃ Ferroelectric Film 559

- Aleksandrov P. A., Zhuk V. I., Litvinov V. L. On the Application of a Transistor Square 3-line Matrix for Redundancy in Digital Nano- and Microintegrated Circuits under Irradiated 569

Our:

Web: www.microsystems.ru/eng; e-mail: nmst@novelex.ru

Нанотехнологии и зондовая микроскопия

NANOTECHNOLOGY AND SCANNING PROBE MICROSCOPY

УДК 53.086

DOI: 10.17587/nmst.20.515-520

А. А. Дудин, канд. физ.-мат. наук, ст. науч. сотр., e-mail: alexanderdudin@msn.com,
А. П. Орлов, канд. физ.-мат. наук, науч. сотр., e-mail: andreyorlov@mail.ru, Е. В. Зенова, д-р техн. наук,
нач. отд., e-mail: elena_zenova@mail.ru, А. М. Тагаченков, канд. физ.-мат. наук, ст. науч. сотр.,
e-mail: alexmitag@yandex.ru

Институт нанотехнологий микроэлектроники РАН (ИНМЭ РАН), Москва

МЕТОДИКА ПОДГОТОВКИ ОДИНОЧНЫХ НАНОТРУБОК ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ИХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК

Поступила в редакцию 12.04.2018

Представлена разработанная методика подготовки и исследования электрических характеристик одиночных углеродных нанотрубок в рамках единого технологического процесса. Показано, что возможно определять электрические характеристики одиночных нанотрубок с высокой точностью и достоверностью. Представленная методика позволяет сократить время исследований и повысить их качество и достоверность. Имеется возможность исследования взаимодействия высокочастотных сигналов с одиночными нанотрубками.

Ключевые слова: нанотрубка, электрические характеристики, подготовка образца, единый процесс, исследование одиночной нанотрубки

Введение

Измерение электрических параметров элементов наноэлектроники является одним из важных этапов контроля качества в техпроцессах [1]. Для контроля качества используются специализированные измерительные системы, входящие в состав зондовых станций. Углеродные нанотрубки (УНТ) чрезвычайно привлекательны для современных высоких технологий благодаря своим механическим и электронным свойствам, миниатюрным размерам и инертности углерода. Уникальные свойства УНТ породили огромный исследовательский интерес к этим объектам, как с точки зрения фундаментальной физики так и с точки зрения возможных практических приложений. Существуют различные способы интегрирования УНТ в конструкцию микровакуумных приборов. Однако для обеспечения надежного функционирования подобных устройств необходимо иметь максимальную информацию об используемых в них нанотрубках и их параметрах.

В данной статье описана уникальная технология подготовки одиночных нанотрубок для исследова-

ния их электрических характеристик с использованием сверхпрецзионного оборудования, аналогичного по характеристикам прибору FEI Helios 650.

Принципиально, методика проведения исследований с использованием одиночной углеродной нанотрубки делится на следующие основные этапы.

1. Подготовка оснастки и измерительного оборудования.
2. Поиск подходящего по параметрам образца.
3. Извлечение выбранного образца — одиночной нанотрубки или пучка нанотрубок.
4. Настройка рабочей конфигурации.
5. Проведение электрических измерений.

Для проведения электрических исследований объектов, схожих по параметрам с одиночными нанотрубками, необходимо сформировать ячейку с трубкой. Основными этапами подготовки ячейки являются следующие.

1. Размещение исходного материала на специальном держателе.
2. Установка держателя в камеру электронного микроскопа или специальной вакуумной камеры.
3. Монтаж и настройка манипуляторов со специальными зондами.

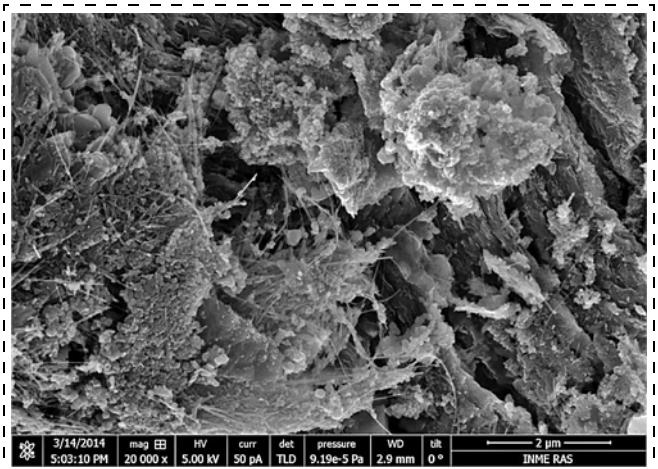


Рис. 1. Внешний вид депозита в электронном микроскопе

Fig. 1. Appearance of the deposit in an electron microscope

4. Откачка рабочей камеры до необходимого уровня вакуума.

5. Визуальный осмотр и поиск подходящего по параметрам объекта исследований.

6. Извлечение выбранного объекта исследований.

7. Позиционирование зондов и формирование ячейки для исследований.

В рабочую вакуумную камеру микроскопа или зондовой станции загружаются необходимые для работы материалы — источник одиночных нанотрубок. В качестве исходного материала могут выступать следующие источники:

- депозит (рис. 1) — нагар, образующийся на электродах, выполненных из углерода в процессе тлеющего разряда;
- углеродные нанотрубки в виде порошка или раствора;
- массив углеродных нанотрубок, синтезированных на кремниевой подложке.

В работе в качестве источника одиночных нанотрубок использовали частички так называемого депозита. Этот материал получается во время тлеющего дугового разряда между двумя электродами. Используемые электроды должны быть выполнены из углерода. Во время горения дуги электроды разрушаются и на их поверхности формируется твердый слой нагара — депозит. Электроды демонтируют и механическим способом нагар удаляют с поверхности. В процессе удаления он распадается на множество мелких кусков размером около 1 мм. На поверхности этих кусков во всех направлениях торчат прямые нанотрубки.

Куски депозита закрепляют на специальном держателе с помощью проводящей клейкой ленты для возможности заземления. Кроме того, пластичность ленты позволяет минимизировать последствия механического контакта зондов, деталей вакуумной камеры и других объектов в рабочей зоне.

Держатель с депозитом устанавливают в камере микроскопа или вакуумной камере на рабочий стол, который обеспечивает пять степеней свободы. Далее выполняется монтаж консоли манипуляторов.

После монтажа держателя и консоли подключают электрические линии для подачи электрических сигналов к измерительной ячейке. Для ввода сигналов был изготовлен специальный вакуумный фланец с электрическими разъемами, совместимыми с высоким вакуумом. Для проведения исследований необходим достаточно высокий уровень вакуума — не хуже 10^{-4} Па. Во время выхода на рабочий режим осуществляется прогрев тигля газового инжектора органических соединений платины, который впоследствии будет использован для фиксации исследуемых объектов на иглах или зонах манипуляторов.

Процесс поиска подходящего объекта исследования заключается в визуальном осмотре кусков депозита и подборе удовлетворяющего определенным требованиям материала, а именно: длины, толщины, чистоты объекта, возможности извлечения его из толщи депозита.

Все эти требования непосредственно влияют на характеристики исследуемого объекта. Поскольку нанотрубки могут быть расположены в толще материала, то не всегда удается выбрать объект, полностью удовлетворяющий предъявленным требованиям. В данном случае был выбран наиболее подходящий объект.

Далее к УНТ постепенно подводится кончик иглы или зонда, закрепленного на манипуляторе вплоть до касания. К этому моменту инжектор органических соединений платины уже нагрет до рабочей температуры и может быть введен в активную зону камеры микроскопа. Чтобы исключить колебания манипуляторов во время движения инжектора, необходимо некоторое время для их стабилизации. После окончания переходных процессов внутри камеры микроскопа можно осуществить касание нанотрубки иглой или зондом для последующего осаждения платины в месте их контакта. В качестве активатора используют электронный луч микроскопа.

После осаждения платины, извлечения инжектора из активной зоны и стабилизации уровня вакуума можно механически извлекать трубку из исходного материала. На минимальной скорости манипулятор движется в противоположную сторону, и трубка медленно извлекается из толщи материала (рис. 2). Когда трубка гарантированно извлечена, держатель с исходным материалом убирается на безопасное расстояние или полностью выводится из активной области камеры микроскопа. Для проверки соосности свободной иглой выполняется касание нанотрубки. При этом обе иглы

предварительно заземляют. Для измерения электрических характеристик вторая игла или зонд подводится к свободному концу трубы на расстояние около 500 нм. Таким образом, формируется измерительная ячейка с одиночной нанотрубкой, например, для изучения низковольтной полевой эмиссии.

Измерение эмиссионных характеристик УНТ проводится по схеме (рис. 3) и выполняется в автоматическом режиме программой для измерения вольт-амперных характеристик (ВАХ), которая управляет программируемым источником-измерителем Keithley 2634B. В программе выбирается режим задачи напряжения, в данном режиме прибор будет работать источником напряжения и осуществлять развертку напряжения на образце и контролировать ток через образец. Для выполнения типичных измерений ВАХ вводят необходимый диапазон и шаг развертки (например, максимальное напряжение 100 В и шаг 50 мВ), устанавливают ограничения по току (например, 300 нА), по достижению которого процесс развертки моментально остановится и напряжение развертки пойдет назад в ноль. Визуальный контроль и определение зазоров между анодом и катодом выполняют по изображениям РЭМ.

Электрически, образцы (эмиссионные структуры) присоединяют к источнику-измерителю по следующей схеме: анод (+) образца — к HI выводу источника, а катод (−) к LO выводу источника и земле, что соответствует рекомендациям по подключению данного прибора к различным тестовым объектам. Для уменьшения уровня влияния шумов и различных электромагнитных наводок для соединений к сигнальным контактам зондовых манипуляторов использовали триаксиальные кабели с низким уровнем шума. Для обеспечения установления корректного эмиссионного зазора и проверки контактного сопротивления структуры между анодом-манипулятором и нанотрубкой (ячейкой) сначала достигается контакт анод-манипулятором с кончиком УНТ, после чего выполняются измерения ВАХ. Обычно при сильной степени прижима (касании) ВАХ имеет омический характер, а при ослаблении меняется на туннельный характер. Далее в режиме наноперемещения по одной координатной оси (соосной с УНТ) анод-манипулятор отводился, тем самым образуя рабочий зазор для измерения эмиссионных ВАХ.

Измеренная ВАХ эмиссионного тока одного из исследуемых эмиттеров на одиночной УНТ

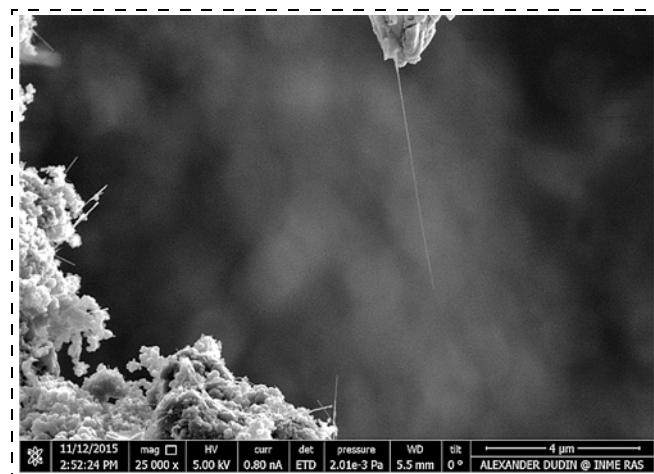


Рис. 2. Извлеченный из толщи материала одиночная нанотрубка
Fig. 2. Single nanotube extracted from the thickness of a material

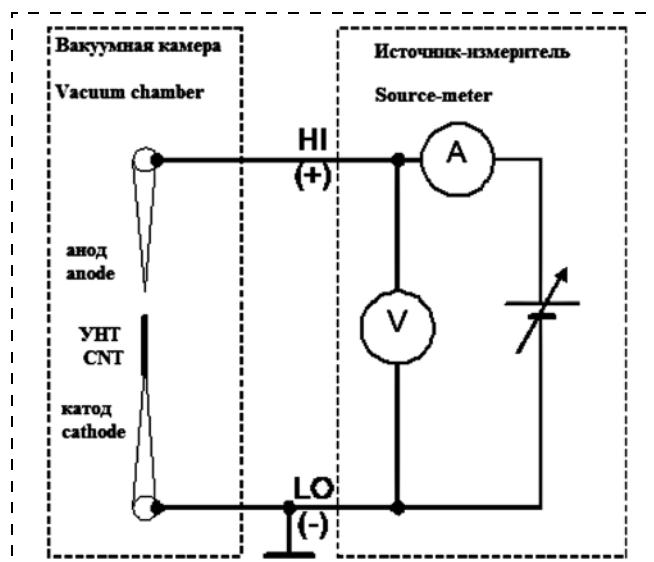


Рис. 3. Электрическая схема измерительного стенда
Fig. 3. Electric circuit of the measuring stand

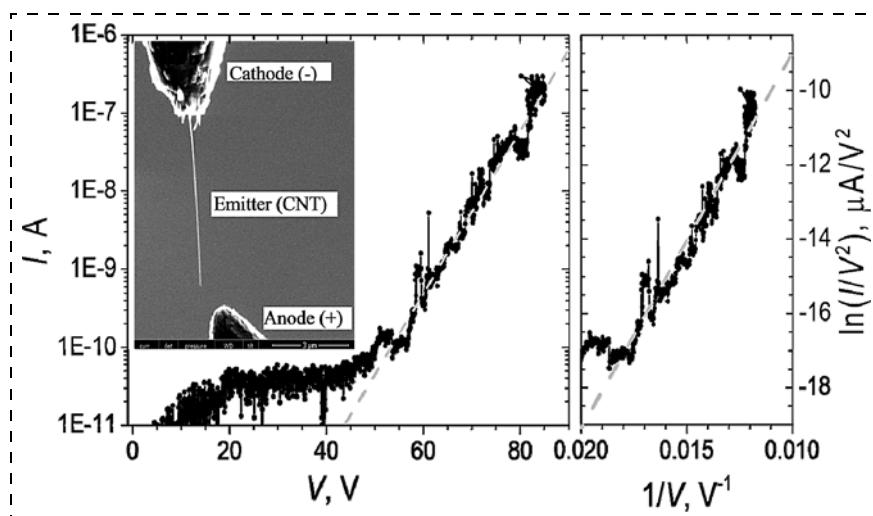


Рис. 4. Эмиссионная структура из одной углеродной нанотрубки и ее ВАХ. Расстояние анод — эмиттер 1 мкм
Fig. 4. Emission structure from a carbon nanotube and its VAC. The anode — emitter distance is 1 μm

приведена на рис. 4 в координатах $\lg I = f(V)$ и перестроена в координатах $\ln(I/V^2) = f(1/V)$ закона Фаулерса—Нордгейма, описывающего ток автоэлектронной эмиссии из металла в вакуум. Эта характеристика измерена при расстоянии анод — эмиттер около 1 мкм. При таком зазоре пороговое поле начала эмиссии составляет не более 50 В, а для получения эмиссионного тока $I \approx 0,3$ мА необходимо приложить анодное напряжение $V = 80$ В. Как видно из графика, ВАХ почти прямолинейна в координатах Фаулерса — Нордгейма, что указывает на автоэлектронный механизм эмиссионного тока.

Заключение

Разработанная методика позволяет исследовать электрические характеристики одиночных нанотрубок [2] или их пучков [3] в рамках единого процесса. Методика позволяет сократить время исследований, увеличить их точность и достоверность. Помимо исследований статических характеристик на сформированных по данной методике эмиссионных ячейках активно исследуются механизмы воздействия высокочастотных электромагнитных полей с УНТ для изучения механических резонансных явлений и возможности детектирования высокочастотных информационных сигналов в режиме автоэлектронной эмиссии [4, 5].

Работа выполнена при поддержке ФАНО и в рамках программы ФНИ государственных академий наук на 2013—2020 годы по направлению 40 "Элементная база микроэлектроники, наноэлектроники и квантовых компьютеров, материалы для микро- и наноэлектроники, нано- и микросистемная техника, твердотельная электроника".

Список литературы

1. Булярский С. В. Углеродные нанотрубки: технология, управление свойствами, применение. Ульяновск: Стрежень, 2011. 484 с.
2. Булярский С. В., Булярская С. А., Вострецова Л. Н., Дудин А. А., Орлов А. П., Павлов А. А., Басаев А. С., Кичюк Е. П., Шаманаев А. А., Шаман Ю. П. Параметры переноса тока контактов металл — углеродные нанотрубки // Нано- и микросистемная техника. 2015. № 5 (178). С. 3—8.
3. Булярский С. В., Булярская С. А., Лакалин А. В., Дудин А. А., Орлов А. П., Павлов А. А., Басаев А. С., Кичюк Е. П., Шаманаев А. А., Шаман Ю. П. Работа выхода пучков углеродных нанотрубок // Нано- и микросистемная техника. 2015. № 6 (179). С. 3—7.
4. Израэльян К. Р., Орлов А. П., Мусатов А. Л., Благов Е. В. Частотные характеристики автоэлектронной эмиссии из длинных углеродных нанонитей/нанотрубок в присутствии слабого переменного электрического поля // Физика твердого тела. 2016. Том 58, Вып. 5. С. 987—990.
5. Saito Y., Seko K., Kinoshita J. Dynamic behavior of carbon nanotube field emitters observed by in situ transmission electron microscopy // Diamond Rel. Mat. 2005. Vol. 14. P. 1843—1947.

A. A. Dudin, Researcher, alexanderdudin@msn.com, **A. P. Orlov**, Researcher, andreyorlov@mail.ru,
E. V. Zenova, Head of Department, elena_zenova@mail.ru, **A. M. Tagachenkov**, Researcher, alexmitag@yandex.ru,
Institute of Nanotechnologies of Microelectronics of the Russian Academy of Sciences, INME RAS, Moscow, 115487, Russian Federation

Corresponding author:

Dudin Alexander A., Researcher, Institute of Nanotechnologies of Microelectronics of the Russian Academy of Sciences, INME RAS, Moscow, 115487, Russian Federation, alexanderdudin@msn.com

Methods for Preparation of Single Nanotubes for Research of Their Electric Characteristics

Received on April 12, 2018
Accepted on May 8, 2018

The paper presents a technique developed for preparation and investigation of the electric characteristics of the single carbon nanotubes within a single technological process. It demonstrates that it is possible to determine the electric characteristics of the single nanotubes with high accuracy and reliability. The presented method allows us to shorten the time for research and increase its quality and reliability. It provides an opportunity to study the interaction between the high-frequency signals and the single nanotubes.

Keywords: nanotube, electric characteristics, sample preparation, single process, study of a single nanotube

For citation:

Dudin A. A., Orlov A. P., Zenova E. V., Tagachenkov A. M. Methods for Preparation of Single Nanotubes for Research of Their Electric Characteristics, *Nano- i Mikrosistemnaya Tekhnika*, 2018, vol. 20, no. 9, pp. 515—520.

DOI: 10.17587/nmst.20.515-520

Introduction

Measurement of the electric parameters of the elements of nanoelectronics is one of the important stages of the quality control in the technological processes [1]. The quality control is ensured by special measuring systems, which are a part of the probe stations. The carbon nanotubes (CNT) are extremely attractive to modern high technologies due to their mechanical and electronic properties, tiny sizes and inertness of the carbon. The unique properties of CNT generated a huge research interest to these objects, both from the point of view of the fundamental physics, and from the point of view of the possible practical applications. There are various ways for integration of CNT in the designs of the microvacuum devices. However, in order to ensure a reliable functioning of such devices it is necessary to have the maximum of information about the used nanotubes and their parameters.

The given article describes the unique technology for preparation of single nanotubes for research of the electric characteristics with the use of the superprecision equipment, similar by its characteristics to FEI Helios 650 device.

Essentially, the technique for carrying out the research with the use of a single CNT has the following basic stages.

1. Preparation of equipment and measuring equipment.
2. Search for a sample of suitable parameters.
3. Extraction of the selected sample — a single nanotube or a bunch of nanotubes.
4. Adjustment of the working configuration.
5. Carrying out of the electric measurements.

For carrying out of the electric research of the objects similar by their parameters to the single nanotubes, it is necessary to form a cell with a tube. The basic stages of preparation of a cell are the following.

1. Placing of the initial material on a special holder.
2. Installation of the holder in the chamber of an electron microscope or special vacuum chamber.
3. Installation and adjustment of the manipulators with special probes.
4. Pumping out from the working chamber down to the necessary level of vacuum.
5. Visual survey and search for an object of research suitable by parameters.
6. Extraction of the selected object of research.
7. Positioning of the probes and formation of a cell for the research.

The materials necessary for the work — the source of the single nanotubes, are loaded into the working vacuum chamber of a microscope or a probe station. The following sources can serve as the initial material:

- Deposit (fig. 1) — the carbon deposit formed on the electrodes, made from carbon in the course of the decaying discharge;

- CNT in the form of a powder or a solution;
- Mass of CNT, synthesized on a silicon substrate.

In the work the particles of the so-called deposit were used as the source of the single nanotubes. This material is a result of the decaying arc discharge between two electrodes. The used electrodes should be made from carbon. During burning of the arch the electrodes collapse and a solid layer of a carbon deposit — the deposit is formed on their surface. The electrodes are dismantled and the deposit is removed mechanically from the surface. In the course of the removal it breaks up to numerous small pieces with the size of about 1 mm. On the surface of these pieces straight nanotubes stick out in all the directions.

Deposit pieces are fixed on a special holder by means of a conducting sticky tape for a possibility of grounding. Besides, the plasticity of the tape allows us to minimize the consequences of the mechanical contact of the probes, parts of the vacuum chamber and other objects in the working zone.

The holder with the deposit is fixed in the chamber of the microscope or in the vacuum chamber on a desktop, which ensures five degrees of freedom. Then, the console of the manipulators is installed.

After installation of the holder and the console the electric circuits are connected for sending of electric signals to the measuring cell. For input of signals a special vacuum flange is manufactured with the electric sockets compatible with high vacuum. The research requires a rather high level of vacuum — not less than 10^{-4} Pa. During transition to the operating conditions the crucible of the gas injector of the organic compounds of platinum is warmed up, which will subsequently be used for fixing of the investigated objects on the needles or probes of the manipulators.

The process of search for a suitable object of research consists in a visual survey of the pieces of the deposit and selection of a material meeting certain requirements, namely: length, thickness, cleanliness of an object, possibility of its extraction from the thickness of the deposit.

All these requirements influence directly the characteristics of the investigated object. Since the nanotubes can be located in the thickness of a material, it is not always possible to select an object completely meeting the presented requirements. In this case the most suitable object was chosen.

Then, the tip of a needle or a probe fixed on the manipulator is gradually brought to CNT, up to a contact. By this moment the injector of the organic compounds of platinum is already warmed up to the working temperature and can be introduced into the active zone of the microscope chamber. In order to eliminate fluctuations of the manipulators during the movement of the injector a certain time is necessary for their stabilization. After termination of the transient processes in the microscope chamber it is possible to carry out a contact with

a nanotube by a needle or a probe for the subsequent sedimentation of platinum in the place of the contact. The electron beam of a microscope is used as the activator.

After sedimentation of platinum, extraction of the injector from the active zone and stabilization of the level of vacuum, it is possible to extract the tube mechanically out of the initial material. At the minimal speed the manipulator is moved to the opposite side, and the tube is extracted slowly from the thickness of the material (fig. 2). When the tube is taken out for sure, the holder with the initial material is moved to a secure distance or removed completely from the active area of the microscope chamber. The coaxiality is checked by a free needle, which contacts the nanotube. At that, both needles are preliminary earthed. For measurement of the electric characteristics the second needle or probe is brought to the free end of the tube at the distance of about 500 nm. Thus, the measuring cell with a single nanotube is formed, for example, for studying of the low-voltage field emission.

Measurement of the emission characteristics of CNT is done according to the circuit (fig. 3) and in an automatic mode by the program for measurement of the volt-ampere characteristics (VAC), which controls Keithley 2634B programmed source-meter instrument. Within the program the mode for setting of voltage is selected, and in the given mode the device will work as a source of voltage and carry out voltage scan on the sample and control the current through the sample. For implementation of the typical measurements of VAC the necessary range and scan step (for example, the maximal voltage of 100 V and a step of 50 mV), the restrictions are set on the current (for example, 300 nA), upon achievement of which the scan process will instantly stop and the voltage scan will go back to a zero. The visual control and determination of the gaps between the anode and the cathode is carried out by SEM images.

The samples (emission structures) are electrically connected to the source-meter according to the following circuit: the anode (+) of the sample — to HI of the source outlet, and the cathode (−) to LO of the source input and earth, which corresponds to the recommendations concerning connection of the given device to various test objects. In order to reduce the level of the noises and various electromagnetic influences, the triaxial cables with low noise level were used for connections to the signal contacts of the probe manipulators. In order to ensure a correct emission gap and to check the contact resistance of the structure between the anode-manipulator and the nanotube (cell), at first a contact is established between the anode-manipulator and CNT tip, then VAC measurements are carried out. Usually, at a strong degree of pressing (contact), VAC has an ohmic character, and in case of its easing it changes for the tunnel character. Then, in the mode of a nanodisplacement along one coordinate axis (coaxial with CNT), the anode-manipula-

tor is taken away, thereby forming a working gap for measurement of the emission VAC.

The measured VAC of the emission current of one of the investigated emitters on a single CNT is presented in fig. 4, in co-ordinates of $\lg I = f(V)$ and is reconstructed in co-ordinates of $\ln(I/V^2) = f(1/V)$ of the Fowler—Nordheim law describing the current of the autoelectronic emission from a metal into vacuum. This characteristic is measured at the anode — emitter distance of about 1 μm. At such a gap the threshold field of the beginning of emission is not more than 50 V, while for reception of the emission current of $I \approx 0.3$ mA it is necessary to apply the anode voltage of $V = 80$ V. As is visible from the schedule, VAC is almost rectilinear in the Fowler — Nordheim co-ordinates, which points to the autoelectron mechanism of the emission current.

Conclusion

The developed technique allows us to investigate the electric characteristics of the single nanotubes [2] or their bunches [3] within the framework of a uniform process. The technique allows us to reduce the time for the research and increase its accuracy and reliability. Besides the research of the static characteristics on the emission cells formed by the given technique, the mechanisms of influence of the high-frequency electromagnetic fields from CNT are actively investigated for studying of the mechanical resonant phenomena and possibility of detection of high-frequency information signals in the mode of the autoelectronic emission [4, 5].

The work was done with support of FANO and within the framework of FNI program of the state academies of sciences for 2013–2020 in the direction 40 "Element base of the microelectronics, nanoelectronics and quantum computers, materials for the micro- and nanoelectronics, nano- and microsystem technologies, solid-state electronics".

References

1. Bulyarskiy S. V. *Uglerodnyye nanotrubki: tekhnologiya, upravleniye svoystvami, primeneniye*, Ul'yanovsk, Strezen', 2011, 484 p. (in Russian).
2. Bularskiy S. V., Bularskaia S. A., Vostretsova L. N., Dudin A. A., Orlov A. P., Pavlov A. A., Basaev A. S., Kittsyk E. P., Shamanaev A. A., Shaman Y. P. Parametry perenosa toka kontaktov metall — uglerodnyye nanotrubki, *Nano- i mikrosistemnaya tekhnika*, 2015, no. 5 (178), pp. 3–8 (in Russian).
3. Bularskiy S. V., Bularskaia S. A., Lokalin A. V., Dudin A. A., Orlov A. P., Pavlov A. A., Basaev A. S., Kittsyk E. P., Shamanaev A. A., Shaman Y. P. Rabota vykhoda puchkov uglerodnykh nanotrubok, *Nano- i mikrosistemnaya tekhnika*, 2015, no. 6 (179), pp. 3–7 (in Russian).
4. Izraeliants K. R., Orlov A. P., Musativ A. L., Blagov E. V. Chastotnyye kharakteristiki avtoelektronnoy emissii iz dlinnykh uglerodnykh nanonitey/nanotrubok v prisutstvii slabogo pere-mennogo elektricheskogo polya, *Fizika tverdogo tela*, 2016, vol. 58, no. 5, pp. 987–990 (in Russian).
5. Saito Y., Seko K., Kinoshita J. Dynamic behavior of carbon nanotube field emitters observed by in situ transmission electron microscopy, *Diamond Rel. Mat.*, 2005, vol. 14, pp. 1843–1947.

МОДЕЛИРОВАНИЕ И КОНСТРУИРОВАНИЕ МНСТ

MODELLING AND DESIGNING OF MNST

УДК 535.016

DOI: 10.17587/nmst.20.521-527

А. А. Дедкова, вед. инженер, e-mail: my_name9999@mail.ru, **В. Ю. Киреев**, д-р техн. наук, ст. науч. сотр., вед. инженер, e-mail: valerikireev@mail.ru, **Н. С. Мазуркин**, канд. техн. наук, вед. инженер, e-mail: edenlab@mail.ru

Национальный исследовательский университет "МИЭТ", Москва

АНАЛИЗ ФЕРРОМАГНИТНЫХ ПЛЕНОК С ПОМОШЬЮ СИСТЕМЫ ИССЛЕДОВАНИЯ МАГНИТООПТИЧЕСКОГО ЭФФЕКТА КЕРРА И СПЕКТРАЛЬНОГО ЭЛЛИПСОМЕТРА

Поступила в редакцию 26.03.2018

Проведены исследования образца ферромагнитной пленки $Fe_{10}Ni_{74}Co_{16}$ толщиной 30 нм после ее осаждения и двух размагничивающих получасовых вакуумных отжигов при температурах 400 и 600 °C. Характеристики пленки, в том числе коэрцитивная сила и поле анизотропии, а также их изменения после отжигов определяли с помощью системы исследования магнитооптического эффекта Керра и спектрального эллипсометра. Показано, что сигнал спектрального эллипсометра I_s реагирует на структуру пленки $Fe_{10}Ni_{74}Co_{16}$, изменяющуюся при вакуумном отжиге. Причем изменение сигнала I_s на длинах волн λ , равных 450 и 650 нм, практически в два раза больше, чем на длинах волн λ , равных 550 и 750 нм.

Ключевые слова: ферромагнитная пленка $Fe_{10}Ni_{74}Co_{16}$, коэрцитивная сила, поле анизотропии, система исследования магнитооптического эффекта Керра, спектральный эллипсометр

Введение

Магнитооптический эффект Керра заключается во вращении плоскости поляризации света, отраженного от намагниченного ферромагнетика. В зависимости от взаимного расположения вектора намагнченности **M**, плоскости ферромагнитного зеркала (поверхности ферромагнитной пленки) и плоскости поляризации света может осуществляться полярное, меридиональное и экваториальное намагничивание образца и, соответственно, наблюдаться полярный, меридиональный и экваториальный эффекты Керра (рис. 1) [1].

Эксперимент

В настоящей работе исследовали образец ферромагнитной пленки $Fe_{10}Ni_{74}Co_{16}$ толщиной 30 нм. Пленка осаждалась на подложку, представляющую собой пластину монокристаллического кремния КДБ-12(100) диаметром 150 мм со слоями термического оксида (SiO_2) толщиной 0,6 мкм и высокотемпературного нитрида кремния (Si_3N_4) толщиной 0,13 мкм, на установке магнетронного рас-

пыления PHASE II J компании AJA International Inc. (США) в подмагничивающем поле $H_0 = 40$ Э.

Были использованы следующие операционные параметры процесса осаждения: температура подложки $T_s = 270$ °C; остаточное давление газов в камере $p_r = 10^{-5}$ Па; мощность, подаваемая на магнетрон $W_m = 160$ Вт; рабочее давление аргона $p = 0,5$ Па.

Образец пленки $Fe_{10}Ni_{74}Co_{16}$ исследовали сразу после получения и после двух получасовых размагничивающих вакуумных отжигов при температурах $T_1 = 400$ °C и $T_2 = 600$ °C на системе для локального исследования магнитооптического эффекта Керра BH-PI7892-MI производства компании NEOARC Corp. (Япония) и с помощью спектрального эллипсометра Auto SE компании Horiba Jobin Yvon (Япония).

В отсутствие внешнего магнитного поля **H** вектор спонтанной намагнченности **M** ферромагнитной пленки направлен по оси легкого намагничивания (ОЛН), совпадающего с направлением подмагничивающего поля H_0 . Перпендикулярно ОЛН в плоскости ферромагнитной пленки лежит

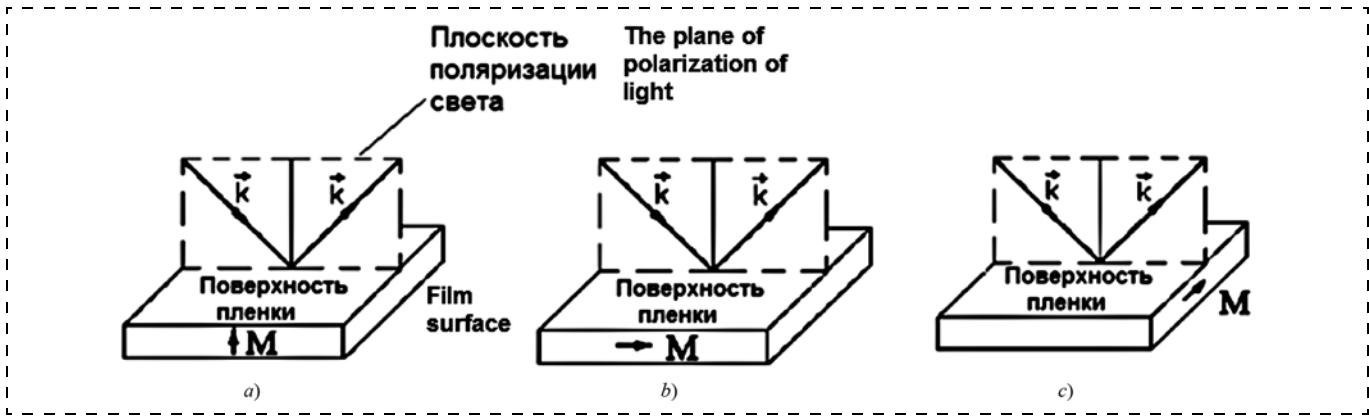


Рис. 1. Взаимное расположение вектора намагниченности \mathbf{M} , плоскости ферромагнитного зеркала (поверхности ферромагнитной пленки) и плоскости поляризации (падения) света в случае полярного (a), меридионального (b) и экваториального (c) эффектов Керра (\mathbf{k} — вектор распространения световой волны). Система координат выбирается так, что ось Z всегда направлена вдоль вектора намагниченности образца \mathbf{M}

Fig. 1. The mutual arrangement of the magnetization vector \mathbf{M} , the plane of the ferromagnetic mirror (the surface of the ferromagnetic film) and the plane of polarization (incidence) of light in the case of polar (a), meridional (b) and equatorial (c) effects of Kerr (\mathbf{k} — propagation vector of the light wave). The coordinate system is selected so that Z axis is always directed along the magnetization vector of sample \mathbf{M}

ось трудного намагничивания (ОТН). При приложении внешнего магнитного поля \mathbf{H} вектор намагниченности \mathbf{M} поворачивается, приближаясь к направлению поля с возрастанием его значения, т. е. существует зависимость $\mathbf{M} = f(\mathbf{H})$ [2].

Для исследуемых образцов в виде тонких ферромагнитных пленок характерен меридиональный эффект Керра, состоящий в повороте плоскости поляризации на угол Керра, обозначаемый как θ_k (далее Theta k на графиках рис. 3, см. вторую сторону обложки), и появлении эллиптичности отраженного света при намагничивании пленки.

Коэрцитивную силу \mathbf{H}_c и поле анизотропии \mathbf{H}_n полученного образца ферромагнитной пленки измеряли в системе для локального исследования магнитооптического эффекта Керра BH-PI7892-MI производства компании NEOARC Corp. (Япония), схема измерения которой представлена на рис. 2.

Монохроматический пучок света, излучаемый лазером 1 с длиной волны $\lambda = 408$ нм, формируемый оптическими элементами 2, 4 и 5, проходя через поляризатор 3, приобретает линейную поляризацию. Линейно поляризованный пучок света диаметром около 3 мкм направляется на образец ферромагнитной пленки 7 практически перпендикулярно ее поверхности (угол падения пучка света β , отсчитываемый от нормали к поверхности пленки, близок к 0° , т. е. $\beta \approx 0^\circ$).

После отражения от поверхности ферромагнитной пленки 7, находящейся во внешнем магнитном поле ($S - N$), создаваемом электромагнитом 6 с блоком питания 12, поляризация света становится эллиптической. Затем пучок света падает на анализатор 8, в качестве которого используется призма Волластона (Wollaston), разделяющая свет на два пучка ортогональной поляризации. Вышедшие из призмы два пучка попадают на фотодиоды фотодетектора 9 с призмой Глана — Томпсона (Glan — Thompson prism), где оптические сигналы превращаются в электрические сигналы, разность которых модулируется и детектируется синхронным детектором 10 и поступает для обработки в компьютер 11, управляющий также работой всей системы [3].

При этом согласно работе [4] угол поворота Керра θ_k (Theta k на графиках рис. 3, см. вторую сторону обложки) пропорционален намагниченности \mathbf{M} ферромагнитной пленки, поэтому кривые намагничивания и петли перемагничивания

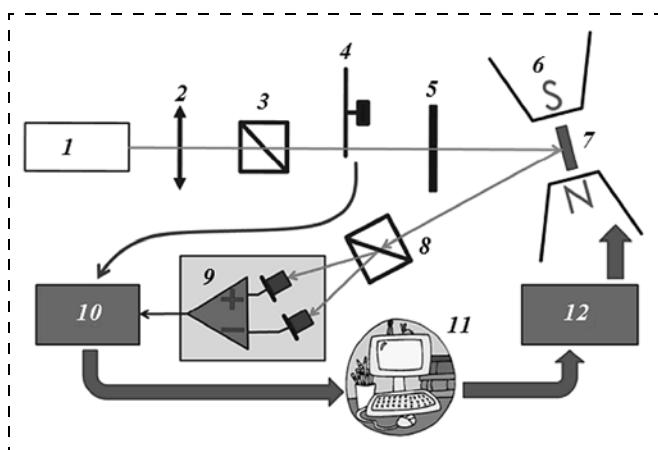


Рис. 2. Схема системы для локального исследования магнитооптического эффекта Керра BH-PI7892-MI: 1 — лазер; 2 — собирающая линза; 3 — поляризатор; 4 — модулятор; 5 — полуволновая пластинка; 6 — электромагнит; 7 — образец ферромагнитной пленки; 8 — анализатор; 9 — фотодетектор; 10 — синхронный детектор; 11 — компьютер; 12 — блок питания

Fig. 2. Circuit of BH-PI7892-MI system for a local study of the magneto-optical effect of Kerr: 1 — laser; 2 — converging lens; 3 — polarizer; 4 — modulator; 5 — half-wave plate; 6 — electromagnet; 7 — ferromagnetic film sample; 8 — analyzer; 9 — photodetector; 10 — synchronous detector; 11 — computer; 12 — power supply unit for the electromagnet

ферромагнитных пленок в системе BH-PI7892-MI получаются не как зависимости $\mathbf{M} = f(\mathbf{H})$, а как зависимости Theta $k = f(\mathbf{H})$ (рис. 3, см. вторую сторону обложки). При получении кривых намагничивания и петли перемагничивания ферромагнитных пленок система BH-PI7892-MI обеспечивает точность вращения образцов по углу α в горизонтальной плоскости на уровне 1°.

Полученные на осажденных и отожженных образцах пленок $\text{Fe}_{10}\text{Ni}_{74}\text{Co}_{16}$ из графиков на рис. 3 (см. вторую сторону обложки) значения коэрцитивной силы \mathbf{H}_c и поля анизотропии \mathbf{H}_n приведены в табл. 1.

Те же образцы осажденных и отожженных пленок $\text{Fe}_{10}\text{Ni}_{74}\text{Co}_{16}$ исследовали на спектральном эллипсометре Auto SE, имеющем диапазон длин волн $\lambda = 440\ldots850$ нм, фиксированный угол падения $\beta = 70^\circ$ с использованием размера области измерения 500×500 мкм [5]. Оптическая схема эллипсометра показана на рис. 4 (см. вторую сторону обложки).

В приборе Auto SE источником излучения является галогенная лампа мощностью 5 Вт и голубой светодиод. Автоматический затвор используется для выявления и подавления шума. Плечо излучателя состоит из источника света, поляризатора и модулятора на жидкокристаллах, объединенных в оптический блок.

На исследуемый образец пленки падает линейно (плоско) поляризованная волна света, которая после отражения становится в общем случае эллиптически поляризованной. После отражения от образца луч идет через жидкокристаллический модулятор и поляризатор. В завершении выходящий свет анализируется на спектрометре. Измерение выполняется на ПЗС-детекторе (детекторе на основе прибора с зарядовой связью) в диапазоне длин волн $440\ldots850$ нм.

В основе эллипсометрических исследований лежит определение отношения комплексных коэффициентов отражения R_p/R_s для двух типов поляризации световой волны: в плоскости падения (p) и перпендикулярно к ней (s). Это отношение принято выражать через эллипсометрические параметры Ψ и Δ , которые характеризуют относительное изменение амплитуд для p - и s -поляризаций и сдвиг фаз между ними [6]:

$$\operatorname{tg}\Psi \exp(i\Delta) = R_p/R_s \quad (1)$$

Действительно физический смысл эллипсометрических параметров, иногда называемых поляризационными параметрами, простой: $\operatorname{tg}\Psi$ показывает отношение амплитуд коэффициентов отражения для p - и s -волн, а параметр Δ равен разности между фазовыми скачками этих волн при отражении.

Комплексные коэффициенты отражения зависят от оптических свойств исследуемой ферромагнитной пленки, а также от угла падения света β и его длины волны λ . Если число параметров, подлежащих определению, больше двух, то можно провести измерения при сканировании длины волны света по спектру (спектральная эллипсометрия) и, тем самым, увеличить число уравнений.

Эллипсометрический эксперимент предполагает последовательное выполнение следующих шагов [6]:

- проведение необходимого числа измерений (определение левой части уравнений вида (1));
- выбор адекватной оптической модели, описывающей отражающие свойства исследуемого образца (моделирование правой части уравнения (1));
- численное решение системы уравнений и определение искомых параметров модели;
- интерпретация полученных числовых результатов на языке физических характеристик исследуемого объекта.

Спектральный эллипсометр Auto SE не измеряет напрямую эллипсометрические параметры Ψ и Δ , они определяются в результате анализа спектра, измеренного на детекторе, при различных положениях жидкокристаллических кристаллов. Зато эллипсометр определяет связанные с ними характеристики I_s и I_c [5]:

$$I_s = \sin 2\Psi \cdot \sin \Delta; \quad (2)$$

$$I_c = \sin 2\Psi \cdot \cos \Delta. \quad (3)$$

Таблица 1
Table 1

Результаты измерений магнитных параметров образца пленки $\text{Fe}_{10}\text{Ni}_{74}\text{Co}_{16}$ с помощью системы для локального исследования магнитооптического эффекта Керра BH-PI7892-MI с $\lambda = 408$ нм при $\beta = 0^\circ$

Results of measurements of the magnetic parameters of the sample of $\text{Fe}_{10}\text{Ni}_{74}\text{Co}_{16}$ film by means of BH-PI7892-MI system for the local research of the magneto-optical Kerr effect with $\lambda = 408$ nm at $\beta = 0^\circ$

Угол ориентации образца пленки $\text{Fe}_{10}\text{Ni}_{74}\text{Co}_{16}$ в горизонтальной плоскости $\alpha = 35^\circ$ (по направлению оси легкого намагничивания (ОЛН)) <i>Angle of orientation of the sample of $\text{Fe}_{10}\text{Ni}_{74}\text{Co}_{16}$ film in the horizontal plane $\alpha = 35^\circ$ (in the direction of the axis of easy magnetization (AEM))</i>	Угол ориентации образца пленки $\text{Fe}_{10}\text{Ni}_{74}\text{Co}_{16}$ в горизонтальной плоскости $\alpha = 125^\circ$ (по направлению оси трудного намагничивания (ОТН)) <i>Angle of orientation of $\text{Fe}_{10}\text{Ni}_{74}\text{Co}_{16}$ in the horizontal plane $\alpha = 125^\circ$ (in the direction of the axis of hard magnetization (AHM))</i>
Коэрцитивная сила \mathbf{H}_c , Э <i>Coercive force \mathbf{H}_c, Oe</i> 2,9 5,7 4,6	Поле анизотропии \mathbf{H}_n , Э <i>Field of anisotropy \mathbf{H}_n, Oe</i> 25,9 17,3 6,4

Таблица 2
Table 2

**Результаты измерений магнитных параметров образца пленки $\text{Fe}_{10}\text{Ni}_{74}\text{Co}_{16}$ с помощью спектрального эллипсометра Auto SE
при $\beta = 70^\circ$**

Results of measurements of the magnetic parameters of the sample of $\text{Fe}_{10}\text{Ni}_{74}\text{Co}_{16}$ film by means of Auto SE spectral ellipsometer at $\beta = 70^\circ$

	Угол ориентации образца пленки $\text{Fe}_{10}\text{Ni}_{74}\text{Co}_{16}$ в горизонтальной плоскости $\alpha = 35^\circ$ (по направлению оси легкого намагничивания (ОЛН)) <i>Angle of orientation of the sample of $\text{Fe}_{10}\text{Ni}_{74}\text{Co}_{16}$ film in the horizontal plane $\alpha = 35^\circ$ (in the direction of the axis of easy magnetization (AEM))</i>				Угол ориентации образца пленки $\text{Fe}_{10}\text{Ni}_{74}\text{Co}_{16}$ в горизонтальной плоскости $\alpha = 125^\circ$ (по направлению оси трудного намагничивания (ОТН)) <i>Angle of orientation of the sample of $\text{Fe}_{10}\text{Ni}_{74}\text{Co}_{16}$ film in the horizontal plane $\alpha = 125^\circ$ (in the direction of the axis of hard magnetization (AHM))</i>			
Длина волны λ , нм <i>Wavelength λ, nm</i>	450	550	650	750	450	550	650	750
Сигнал до отжига I_{s1} <i>Signal before annealing I_{s1}</i>	0,882	0,705	0,616	0,562	0,880	0,702	0,614	0,559
Сигнал после первого отжига при $I_{s2} T_1 = 400^\circ\text{C}$ <i>Signal after the first annealing at $I_{s2} T_1 = 400^\circ\text{C}$</i>	0,816	0,672	0,555	0,525	0,821	0,676	0,564	0,531
Сигнал после второго отжига при $I_{s3} T_2 = 600^\circ\text{C}$ <i>Signal after the second annealing at $I_{s3} T_2 = 600^\circ\text{C}$</i>	0,781	0,658	0,527	0,504	0,782	0,657	0,524	0,506
Разность сигналов $ I_{s3} - I_{s1} $ <i>Difference of signals $I_{s3} - I_{s1}$</i>	0,101	0,048	0,089	0,057	0,099	0,045	0,091	0,053
Разность сигналов $ I_{s3} - I_{s2} $ <i>Difference of signals $I_{s3} - I_{s2}$</i>	0,066	0,033	0,061	0,037	0,060	0,026	0,050	0,029

При этом значения характеристики I_s составляют первичный набор данных, определяющей параметры образца пленки $\text{Fe}_{10}\text{Ni}_{74}\text{Co}_{16}$, и являются ключевыми элементами спектра, используемого для моделирования.

Образец пленки $\text{Fe}_{10}\text{Ni}_{74}\text{Co}_{16}$ на столике спектрального эллипсометра Auto SE вращали в горизонтальной плоскости вручную, по этой причине точность выставления угла α составляла $\pm 5^\circ$. Данные на осажденных и отожженных образцах пленок $\text{Fe}_{10}\text{Ni}_{74}\text{Co}_{16}$ снимали при углах $\alpha = 35^\circ$ и $\alpha = 125^\circ$ на четырех длинах волн λ : 450, 550, 650 и 750 нм. Для каждого образца, угла и длины волны значения характеристики I_s снимали по 3 раза, чтобы учесть возможные флуктуации, вызванные аппаратными ошибками, а затем усредняли и занесли в табл. 2.

Хотя следует отметить, что наибольшие вариации характеристики I_s неотожженного образца пленки $\text{Fe}_{10}\text{Ni}_{74}\text{Co}_{16}$ наблюдали при углах $\alpha = 90^\circ$ и $\alpha = 270^\circ$.

Заключение

На основании проведенных экспериментов можно сделать следующие выводы:

1. Образец пленки $\text{Fe}_{10}\text{Ni}_{74}\text{Co}_{16}$ не размагнился после первого вакуумного отжига при температуре $T_1 = 400^\circ\text{C}$ в течение 30 мин, так как пет-

ли перемагничивания относительно оси легкого намагничивания (ОЛН) под углом $\alpha = 35^\circ$ (см. рис. 3, позиции *a* и *b*) практически не изменились. Это свидетельствует о том, что точка Кюри для исследуемой пленки лежит выше 400°C .

2. После второго вакуумного отжига при температуре $T_2 = 600^\circ\text{C}$ в течение 30 мин образец пленки $\text{Fe}_{10}\text{Ni}_{74}\text{Co}_{16}$ размагнился, что определяется по исчезновению оси трудного намагничивания (ОТН) под углом $\alpha = 125^\circ$ (см. рис. 3, позиция *e*, см. вторую сторону обложки). В процессе остывания образца поле Земли навело анизотропию под углом $\alpha \approx 70^\circ$, что было зафиксировано экспериментально. Для того чтобы поле анизотропии не наводилось, пластину нужно вращать в процессе остывания.

3. Сигнал спектрального эллипсометра I_s реагирует на структуру пленки $\text{Fe}_{10}\text{Ni}_{74}\text{Co}_{16}$, изменяющуюся в процессе вакуумного отжига. Причем изменение сигнала I_s на длинах волн $\lambda = 450$ нм и $\lambda = 650$ нм практически в два раза больше, чем на длинах волн $\lambda = 550$ нм и $\lambda = 750$ нм (см. табл. 2).

4. Проблема тарировки сигнала спектрального эллипсометра I_s для измерения значений коэрцитивной силы H_c и поля анизотропии H_n ферромагнитных пленок нуждается в дополнительных исследованиях.

Список литературы

1. Tumanski S. Thin Film Magnetoresistive Sensors. London: IOP Publishing Ltd, 2001. 441 p.
2. Шемякин С. Компонентные AMR-датчики положения и угла поворота от компании Honeywell // Компоненты и технологии. 2012. № 11. С. 24–30.
3. Система по изучению магнитооптического эффекта Kerra BH-PI7892-MI производства NEOARK CORPORATION (Япония). Техническая документация.
4. Aroyres P. N. Theory of the Faraday and Kerr Effects in Ferromagnetics // Physical Review. 1955. Vol. 97, N. 2. P. 334–345.
5. Спектральный эллипсометр Auto SE производства компании Horiba Jobin Yvon (Япония). Техническая документация.
6. Швец В. А., Спесивцев Е. В., Рыхлицкий Е. В. и др. Эллипсометрия — прецизионный метод контроля тонкопленочных структур с субнанометровым разрешением // Российские нанотехнологии. 2009. Т. 4, № 3—4. С. 72–84.

A. A. Dedkova, Leading Engineer, my_name9999@mail.ru, **V. Yu. Kireev**, D. Sci., Leading Engineer, valerikireev@mail.ru, **N. N. Mazurkin**, Ph. D., Leading Engineer, edenlab@mail.ru, National Research University of Electronic Technology "MIET", Moscow, Zelenograd, 124498, Russian Federation

Corresponding author:

Kireev Valeriy Yu., Leading Engineer, National Research University of Electronic Technology "MIET", Moscow, Zelenograd, 124498, Russian Federation, valerikireev@mail.ru

Analysis of the Parameters of the Ferromagnetic Films by Means of the System for Research of the Magneto-optical Effect of Kerr and a Spectral Ellipsometer

Received on March 26, 2018

Accepted on May 17, 2018

A sample of Fe₁₀Ni₇₄Co₁₆ ferromagnetic film of 30 nm thickness was investigated after its deposition and two demagnetizing half-hour vacuum annealings at the temperatures of 400 °C and 600 °C. The magnetic parameters of the film, namely, the coercive force and the anisotropy field, as well as their changes after the annealings, were determined using a system for studying of the magneto-optical effect of the Kerr and a spectral ellipsometer. A sample of the Fe₁₀Ni₇₄Co₁₆ film was not demagnetized after the first vacuum annealing at the temperature of T₁ = 400 °C during 30 minutes, since the magnetic loop relative to the axis of easy magnetization (AEM) at angle α = 35° did not change. This means that the Curie point for the studied film lies above 400 °C. It is shown that the signal of the spectral ellipsometer reacts to the change of the magnetic parameters of the Fe₁₀Ni₇₄Co₁₆ film changing during a vacuum annealing. Moreover, the response range at the wavelengths of λ = 450 nm and λ = 650 nm is almost twice as large, than at the wavelengths of λ = 550 nm and λ = 750 nm. The problem of calibration of the signal of the spectral ellipsometer I_s for measuring of the values of the coercive force H_c and the anisotropy field H_n of the ferromagnetic films needs additional research.

Keywords: Fe₁₀Ni₇₄Co₁₆ ferromagnetic film, coercive force, anisotropy field, system for research of the magneto-optical effect of Kerr, spectral ellipsometer

For citation:

Dedkova A. A., Kireev V. Yu., Mazurkin N. N. Analysis of the Parameters of the Ferromagnetic Films by Means of the System for Research of the Magneto-optical Effect of Kerr and a Spectral Ellipsometer, *Nano- i Mikrosistemnaya Tekhnika*, 2018, vol. 20, no. 9, pp. 521–527.

DOI: 10.17587/nmst.20.521-527

Introduction

The magneto-optical effect of Kerr consists in rotation of the plane of polarization of the light reflected from a magnetized ferromagnetic. Depending on the relative positioning of the vector of magnetization of **M**, the plane of a ferromagnetic mirror (the surface of the ferromagnetic film) and the plane of polarization of light, a polar, meridional and equatorial magnetization of the sample can be carried out, and, accordingly, the polar, meridional and equatorial effects of Kerr can be observed (fig. 1) [1].

Experiment

We investigated a sample of a ferromagnetic film of Fe₁₀Ni₇₄Co₁₆ with thickness of 30 nm. The film was deposited on a substrate, which was a wafer of KDB-12 (100) monocrystal silicon with diameter of 150 mm with layers of thermal oxide (SiO₂) of 0.6 μm thickness and high-temperature silicon nitride (Si₃N₄) with thickness of 0.13 μm. Process deposition of a film was implemented on magnetron sputtering tool PHASE II J, AJA International Inc. (USA) under magnetic bias field near substrate of H₀ = 40 Oe.

The following operational parameters were used: temperature of the substrate — $T_s = 270$ °C; residual pressure of gases in the chamber — $p_r = 10^{-5}$ Pa; power submitted to the magnetron — $W_m = 160$ W; working pressure of argon — $p = 0.5$ Pa.

A sample of $\text{Fe}_{10}\text{Ni}_{74}\text{Co}_{16}$ film was investigated after its deposition and two half-hour demagnetizing vacuum annealings at $T_1 = 400$ °C and $T_2 = 600$ °C on BH-PI7892-MI system manufactured by NEOARC Corp. (Japan), for the local research of the magneto-optical Kerr effect and by means of Auto SE spectral ellipsometer from Horiba Jobin Yvon (Japan).

In absence of the external magnetic field \mathbf{H} , the vector of the spontaneous magnetization of \mathbf{M} of the ferromagnetic film is directed along the axis of easy magnetization (AEM), coinciding with the direction of the magnetic bias field \mathbf{H}_0 . In the plane of the ferromagnetic film, perpendicularly to AEM, there is the axis of hard magnetization (AHM). When the external magnetic field \mathbf{H} is applied, the vector of magnetization \mathbf{M} turns, coming nearer to the direction of the field with an increase of its value, i.e. there is a dependence $\mathbf{M} = f(\mathbf{H})$ [2].

For the investigated samples in the form of thin ferromagnetic films the meridional Kerr effect is characteristic. It consists in a turn of the plane of polarization by Kerr angle, designated as θ_k and occurrence of ellipticity of the reflected light during the film magnetization.

The coercive force \mathbf{H}_c and the field of anisotropy \mathbf{H}_n of the received sample of the ferromagnetic film was measured in BH-PI7892-MI system manufactured by NEOARC Corp. (Japan) for the local research of the magneto-optical Kerr effect. The measurement circuit this system is shown on fig. 2.

A monochromatic beam of light radiated by laser 1 with the wavelength $\lambda = 408$ nm, formed by optical elements 2, 4 and 5, passing through polarizer 3, acquires a linear polarization. The linearly polarized beam of light with diameter of about $3 \mu\text{m}$ is directed to the sample of the ferromagnetic film 7 practically perpendicularly to its surface (the incidence angle of the beam of light β , counted from a normal to the film surface, is close to 0° , i.e. $\beta \approx 0^\circ$).

After reflection from the surface of the ferromagnetic film 7, which is in the external magnetic field ($S - N$), created by the electromagnet 6 with a power unit 12, the light polarization becomes elliptic. Then, the beam of light falls on the analyzer 8, the role of which is played by the Wollaston prism, which divides light into two beams of orthogonal polarization. The two beams coming from the prism get to the photodiodes of the photodetector 9 with Glan — Thompson prism, where the optical signals turn into the electric signals, the difference of which is modulated and detected by the syn-

chronous detector 10 and arrives for processing in computer 11, which controls operation of all the system [3].

At that, according to [4], Kerr angle of turn θ_k (Theta k on diagrams of fig. 3, see the 2nd side of cover) is proportional to magnetization \mathbf{M} of the ferromagnetic film, therefore, the curves of the magnetization and the loops of the magnetic reversal of the ferromagnetic films in BH-PI7892-MI system turn out not as $\mathbf{M} = f(\mathbf{H})$ dependences, but as dependences of Theta $k = f(\mathbf{H})$ (fig. 3, see the 2nd side of cover). During reception of the curves of magnetization and the loops of magnetic reversal of the ferromagnetic films, BH-PI7892-MI system ensures accuracy of rotation of the samples by angle α in the horizontal plane at the level of 1° .

The values of the coercive force \mathbf{H}_c and field of anisotropy \mathbf{H}_n , received on the deposited and annealed samples of $\text{Fe}_{10}\text{Ni}_{74}\text{Co}_{16}$ films from diagrams in fig. 3 (see the 2nd side cover) are presented in table 1.

The same samples of the deposited and annealed films of $\text{Fe}_{10}\text{Ni}_{74}\text{Co}_{16}$ were investigated on Auto SE spectral ellipsometer with the range of the wavelengths λ (440 — 850) nm, fixed incidence angle $\beta = 70^\circ$ with the use of the size of the area of measurement (500×500) μm [5]. The optical circuit of the ellipsometer is shown in fig. 4, see the 2nd side of cover.

In Auto SE device the source of radiation is a halogen lamp with power of 5 W and a blue light-emitting diode. For detection and suppression of noise an automatic shutter is used. The radiator shoulder consists of a light source, a polarizer and a modulator on the liquid crystals integrated in the optical unit.

A polarized wave of light falls linearly (plainly) on the investigated sample of a film, which after its reflection becomes elliptically polarized. After the reflection from the sample the beam goes through the liquid crystal modulator and the polarizer. In the end, the outgoing light is analyzed in the spectrometer. Measurement is carried out on a CCD detector (the detector based on a charge-coupled device) within the range of the wavelengths of 440...850 nm.

The ellipsometric research is based on determination of the relation of the complex reflection coefficients R_p/R_s for two types of polarization of a light wave: in the plane of incidence (p) and in the one which is perpendicular to it (s). This relation is usually expressed through the ellipsometric parameters Ψ and Δ , which characterize the relative variation of the amplitudes for p - and s -polarizations and the phase shift between them [6]:

$$\operatorname{tg}\Psi \exp(i\Delta) = R_p/R_s. \quad (1)$$

Indeed, the physical meaning of the ellipsometric parameters, which are sometimes called polarizing parameters, is simple: $\operatorname{tg}\Psi$ shows the relation of the am-

plitudes of the reflection coefficients for *p*- and *s*-waves, while the parameter Δ is equal to the difference between the phase jumps of these waves during the reflection.

The complex reflection coefficients depend on the optical properties of the investigated ferromagnetic film, and also on the incident angle of light β and its wavelength λ . If the number of the parameters, which are subject to determination, is more than two, it is possible to make measurements during scanning of the light wavelength by the spectrum (spectral ellipsometry) and thus increase the number of the equations.

The ellipsometric experiment envisages a consecutive implementation of the following steps [6]:

- carrying out of the necessary number of measurements (determination of the left part of the equations of the kind (1));
- selection of an adequate optical model describing the reflecting properties of the investigated sample (modeling of the right part of the equation (1));

— a numerical solution to the system of the equations and determination of the required model parameters;

— interpretation of the received numerical results in the language of the physical characteristics of the investigated object.

Auto SE spectral ellipsometer does not measure directly the ellipsometric parameters of Ψ and Δ , they are determined as a result of an analysis of the spectrum, measured by the detector at different positions of the liquid crystals. However, the ellipsometer determines the characteristics of I_s and I_c [5] connected with them:

$$I_s = \sin 2\Psi \cdot \sin \Delta, \quad (2)$$

$$I_c = \sin 2\Psi \cdot \cos \Delta. \quad (3)$$

At that, the values of characteristic I_s are the initial set of the data, which determine the parameters of the sample of $\text{Fe}_{10}\text{Ni}_{74}\text{Co}_{16}$ film and are the key elements of the spectrum used for modeling.

The sample of $\text{Fe}_{10}\text{Ni}_{74}\text{Co}_{16}$ film was rotated in a horizontal plane manually on a little table of Auto SE spectral ellipsometer, for this reason the accuracy of setting of angle α was $\pm 5^\circ$. The data on the deposited and annealed samples of $\text{Fe}_{10}\text{Ni}_{74}\text{Co}_{16}$ films were recorded at angles $\alpha = 35^\circ$ and $\alpha = 125^\circ$ on the wavelengths of λ : 450, 550, 650 and 750 nm. For each sample, angle and wavelength the values of characteristic I_s were taken 3 times in order to consider the possible fluctuations caused by the hardware errors, and then they were averaged and brought into table 2.

Although it is necessary to point out, that the greatest variations of characteristic I_s of the unannealed sample of $\text{Fe}_{10}\text{Ni}_{74}\text{Co}_{16}$ film was observed at angles $\alpha = 90^\circ$ and $\alpha = 270^\circ$.

Conclusion

On the basis of the experiments it is possible to draw the following conclusions:

1. The sample of $\text{Fe}_{10}\text{Ni}_{74}\text{Co}_{16}$ film was not demagnetized after the first vacuum annealing at $T_1 = 400^\circ\text{C}$ during 30 min., because the loops of the magnetic reversal practically did not change in relation to the axis of easy magnetization (AEM) at angle $\alpha = 35^\circ$ (fig. 3, positions *a* and *b*, see the 2nd side of cover). This testifies to the fact that the Curie point for the investigated film is above 400°C .
2. After the second vacuum annealing at $T_2 = 600^\circ\text{C}$ during 30 min. the sample of $\text{Fe}_{10}\text{Ni}_{74}\text{Co}_{16}$ film became demagnetized, which was defined by the disappearance of the axis of hard magnetization (AHM) at angle $\alpha = 125^\circ$ (fig. 3, position *e*, see the 2nd side of cover). In the course of cooling of the sample, the field of the Earth induced anisotropy at angle $\alpha \sim 70^\circ$, which was recorded experimentally. In order to avoid the field anisotropy, the plate should be rotated in the course of cooling.
3. The signal of the spectral ellipsometer I_s reacts to the structure of $\text{Fe}_{10}\text{Ni}_{74}\text{Co}_{16}$ film, which changes in the course of the vacuum annealing. At that, the change of signal I_s on the wavelengths of $\lambda = 450$ nm and $\lambda = 650$ nm is practically twice is more than on the wavelengths of $\lambda = 550$ nm and $\lambda = 750$ nm (see the table).
4. The problem of calibration of the signal of spectral ellipsometer I_s for measurement of the values of the coercive force \mathbf{H}_c and fields of anisotropy \mathbf{H}_n of the ferromagnetic films requires an additional research.

The work was performed on the equipment of MIET Core facilities center "Microsystem technique and the bases of electronic components", supported by the Ministry of Education and Science of the Russian Federation (state contract No. 14.594.21.0012, unique identifier of the project RFMEF159417X0012).

References

1. Tumanski S. *Thin Film Magnetoresistive Sensors*, London, IOP Publishing Ltd, 2001, 441 p.
2. Shemyakin S. Komponentnye AMR-datchiki polozheniya i ugla poverota ot kompanii "Honeywell", *Komponenty i technologii*, 2012, no. 11, pp. 24–30 (in Russian).
3. Technical documentation for "System for the study of magneto-optical effect of Kerr BH-PI7892-MI manufactured by NEOARK CORPORATION (Japan)".
4. Aroyres P. N. Theory of the Faraday and Kerr Effects in Ferromagnetics, *Physical Review*, 1955, vol. 97, No 2, pp. 334–345.
5. Technical documentation for "Auto SE Spectral ellipsometer manufactured by Horiba Jobin Yvon (Japan)".
6. Shvets V. A., Spesivtsev E. V., Rychlicki E. V. et al. Ellipsometriya — precisionnyi metod kontrolya tonkoplenochnyh struktur s subnanometrovym razresheniem, *Rossiyskie nanotechnologii*, 2009, vol. 4, no. 3–4, pp. 72–84 (in Russian).

МАТЕРИАЛОВЕДЧЕСКИЕ И ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ МНСТ SCIENCE OF MATERIALS AND TECHNOLOGICAL BASICS OF MNST

УДК 537.533

DOI: 10.17587/nmst.20.528-534

Д. Г. Лапин, аспирант, И. С. Овчинников, аспирант, С. В. Пахомов, аспирант,
e-mail: ivan-ovchinnikov@mail.ru,
Московский технологический университет

ИОННО-СТИМУЛИРОВАННОЕ РАСПЫЛЕНИЕ ПОВЕРХНОСТИ ПОЛИКРИСТАЛЛИЧЕСКОЙ МЕДИ ВЫСОКОЭНЕРГЕТИЧЕСКИМИ ИОНАМИ ГАЛЛИЯ

Поступила в редакцию 11.04.2018

Исследована проблема локального ионно-стимулированного распыления поверхности поликристаллической меди высокоенергетическими ионами галлия. Даны оценка влиянию эффекта канализации на коэффициент распыления поликристаллической меди. Определена зависимость шероховатости поверхности поликристаллической меди, полученной в результате локального ионно-стимулированного распыления ее поверхности в отсутствии прекурсора, с применением паров воды (H_2O), хлора (Cl_2) и гексакарбонилвольфрама ($W(CO)_6$), от тока и энергии пучка ионов. Показано, что минимальная шероховатость поверхности получается при использовании H_2O в качестве прекурсора, а максимальная шероховатость — при использовании Cl_2 . Установлено что при увеличении тока и энергии пучка ионов шероховатость поверхности увеличивается.

Ключевые слова: внутрисхемное редактирование, локальное ионно-стимулированное распыление, поликристаллическая медь, наноструктурирование, фокусированный ионный пучок, эффект канализации

Введение

Технология фокусированного ионного пучка находит применение в различных отраслях науки и техники [1–2]. Однако наиболее востребованной она остается в области анализа отказов и диагностики полупроводниковых структур и элементов nanoэлектроники [3].

Надежность и высокое качество работы выводимого на рынок изделия микроэлектроники требует особого внимания к вопросам диагностики и отладки кристалла на этапе тестового производства [4]. В первых прототипах ИМС значительная часть ошибок в дизайне топологии содержится в трассировке межуровневых соединений [5]. Внесение любых изменений в топологию готовой ИМС предполагает производство новых литографических масок, что влечет за собой дополнительные финансовые затраты [6]. Исключить потребность в новых литографических масках позволяет технология внутрисхемного редактирования ИМС, одной

из составляющей которой является метод локального ионно-стимулированного распыления [7, 8]. Метод позволяет вносить локальные изменения в электрическую схему ИМС без нарушения ее работоспособности [9–11]. Особенностью современных ИМС является формирование межуровневой металлизации из поликристаллической меди [12]. Анализ работы [13] показывает, что при взаимодействии пучка высокоенергетических ионов галлия с поверхностью поликристаллической меди возникает эффект канализации. Эффект канализации оказывает существенное влияние на процесс локального ионно-лучевого распыления меди. По мере того как ионный пучок становится падающим в направлении канализации коэффициент распыления уменьшается [14]. Следовательно, скорость распыления зерен поликристаллической меди с различной кристаллографической ориентацией будет отличаться, что приведет к образованию непрогнозируемого рельефа обрабатываемой поверхности (рис. 1).

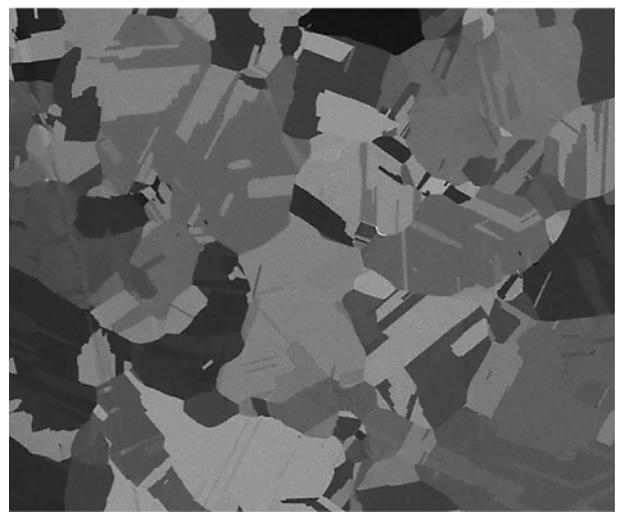


Рис. 1. Изображение поперечного сечения

Fig. 1. Cross-section image

В работе [15] показано, что при ионно-лучевом распылении аморфной меди эффект канализования не проявляется и, как следствие, распыление проходит с одинаковой скоростью по всей обрабатываемой поверхности. В свою очередь исследования, представленные в работе [16], показывают, что изменение кристаллической решетки приповерхностных слоев поликристаллической меди также способствует выравниванию скорости травления по всей области сканирования. Одним из способов аморфизации приповерхностных слоев поликристаллической меди в процессе локального ионно-лучевого распыления является применение газов-прекурсоров, которые при взаимодействии с поверхностью изменяют ее структуру и свойства. Газ-прекурсор подается в камеру двулучевой системы в область, в которой происходит ионная бомбардировка поверхности.

Таким образом, целью данной работы является анализ влияния типа газа-прекурсора на результат локального ионно-лучевого распыления поликристаллической меди высокоэнергетическими ионами галлия.

Эксперимент

В качестве образца для исследований выбран участок системы металлизации на основе поликристаллической меди в интегральной микросхеме, выполненной по технологическому процессу 90 нм.

Метод локального ионно-стимулированного распыления реализован с использованием двулучевой системы *FEI Qanta 3D* с галлиевым жидкотекущим ионным источником. В качестве газов-прекурсоров в процессе эксперимента были

использованы пары воды (H_2O), хлор (Cl_2) и металлоорганический газ — гексакарбонилвольфрам ($W(CO)_6$).

В ходе эксперимента на участке системы металлизации методом локального ионно-лучевого распыления были сформированы 64 прямоугольных углубления со следующими геометрическими размерами: глубина — 1 мкм, длина — 10 мкм, ширина — 10 мкм.

В процессе эксперимента изменяли тип подаваемого к поверхности образца газа-прекурсора (H_2O , Cl_2 , $W(CO)_6$), энергию первичных ионов галлия (U_{HV}) (при варьировании в диапазоне 5...30 кВ) и ток первичного пучка ионов галлия (I_{beam}) (при варьировании в диапазоне 24...2500 пА). Также эксперимент был проведен при бомбардировке участка поверхности без введения прекурсоров.

Для характеристики результата процесса ионно-лучевого травления поликристаллической меди использовано среднее арифметическое отклонение профиля поверхности (R_a), определяемое по формуле [17]

$$R_a = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |y_i|, \quad (1)$$

где y_i — абсолютное значение отклонения профиля от средней линии m в пределах базовой длины.

Измерение шероховатости поверхности выполнено с применением лазерного профилометра *Keyence* с разрешающей способностью по глубине 0,5 нм [18].

Анализ результатов эксперимента

В результате проведенных исследований установлены зависимости значения среднего арифметического отклонения профиля поверхности, получаемого при травлении меди, от ускоряющего напряжения и тока пучка ионов, а также от типа используемого прекурсора (рис. 2).

Стоит отметить, что при значительных токах пучка практически во всех экспериментах уровень шероховатости поверхности увеличивался в несколько раз. Как известно, процесс ионно-стимулированного травления состоит из химической реакции прекурсора с образцом и непосредственно ионного распыления. Если ток ионного пучка составляет порядка 10^{-9} А, процесс ионного распыления становится преобладающим, а химическая реакция практически не влияет на травление мишени. Следовательно, эффекта канализирования избежать невозможно. Также очевидно, что ускоряющее напряжение несущественно влияет на значение шероховатости, что обусловлено незначительным повышением коэффициента распыления материала при увеличении энергии ионов.

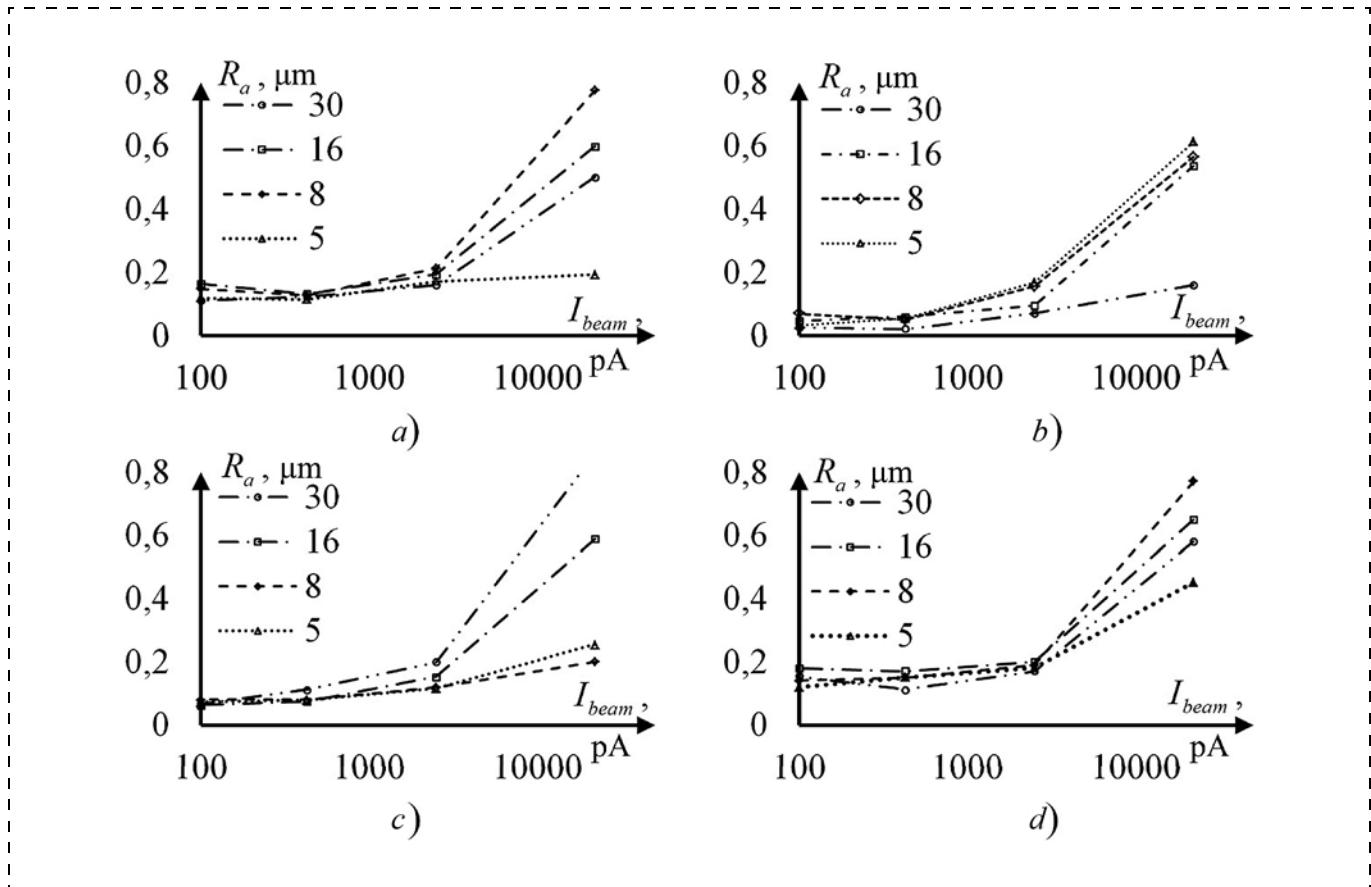


Рис. 2. Зависимость R_a от ускоряющего напряжения и тока пучка ионов: *a* — при отсутствии прекурсора; *b* — с прекурсором H_2O ; *c* — с прекурсором $W(CO)_6$; *d* — с прекурсором Cl_2

Fig. 2. Dependence of R_a on the accelerating voltage and current of the beam of ions: a — in absence of the precursor; b — with the precursor of H_2O ; c — with the precursor of $W(CO)_6$; d — with the precursor of Cl_2

Также анализ полученных результатов эксперимента позволяет определить минимальную степень шероховатости поверхности, полученную в результате ионно-лучевого распыления поликристалли-

ческой меди при введении прекурсоров различного типа (рис. 3).

Максимальный уровень шероховатости поверхности проявился при ионно-стимулированном травлении меди с добавлением прекурсора Cl_2 . Исследование ионно-лучевого травления меди в совокупности с применением Cl_2 обусловлено анализом положительных результатов схожей по своей природе работы [19] в области плазмохимического травления меди. Однако в данном случае положительных результатов добиться не удалось. Скорее всего, это связано с тем, что в работе [19] положительные результаты были получены при высоких температурах (≈ 200 °C). В таких условиях продукты реакции становятся летучими и легко удаляются от поверхности вакуумной системой. Кроме того, установлено, что в результате ионного травления меди ионным пучком с добавлением Cl_2 на поверхности образуются нежелательные продукты реакции, имеющие низкое удельное сопротивление, что может стать причиной возникновения паразитных электрических связей в системе межуровневой металлизации ИМС.

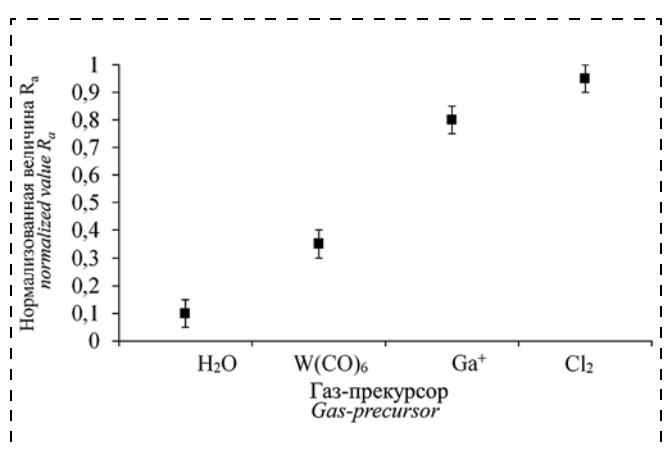


Рис. 3. Зависимость минимального значения R_a поверхности поликристаллической меди от типа выбранного газа прекурсора

Fig. 3. Dependence of the minimal value of R_a of the surface of the polycrystalline copper on the type of the selected gas-precursor

В результате исследований установлено, что при травлении поликристаллической медной пластины ионами Ga^+ степень шероховатости незначительно меньше, чем при травлении с добавлением прекурсора Cl_2 . Как и предполагалось, это вызвано эффектом канализации ионов в неоднородной кристаллографической структуре медной подложки.

Относительно низкая степень шероховатости поверхности меди (по сравнению с Ga^+ и Cl_2) получена при травлении меди через сформированный тонкий (порядка 10 нм) слой вольфрама. Особенность такого подхода заключается в необходимости напыления нового слоя из вольфрама после каждой итерации травления меди. Снижение значения шероховатости поверхности обусловлено тем, что осаждаемые молекулы вольфрама имплантируются в приповерхностные слои меди. Это приводит к изменению ориентации решетки в приповерхностных слоях, делая ее более однородной, тем самым выравнивая скорости травления отдельных зерен [16]. К недостатку такого подхода можно отнести существенное увеличение времени травления по сравнению с травлением меди с применением воды.

Использование воды в качестве прекурсора позволило получить минимальную шероховатость поверхности. Причиной этого является тот факт, что в процессе облучения паров воды пучком ионов она разделяется на водород и кислород. В свою очередь, кислород окисляет приповерхностный слой медной мишени. Следовательно, ионы, участвующие в процессе травления, будут взаимодействовать с оксидом меди, в котором эффект канализации выражен значительно ниже [20]. К тому же, вода имеет высокий коэффициент прилипания к поверхности, а также позволяет повысить селективность травления меди относительно диэлектриков.

Заключение

Проведенные в данной работе исследования позволяют сделать ряд выводов. Во-первых, вследствие поликристаллической структуры меди, используемой в межуровневой металлизации ИМС, возникает эффект канализации, способствующий неравномерному протеканию процесса ионно-лучевого травления. Во-вторых, установлено, что при стимулированном ионно-лучевом травлении меди с использованием воды среднее арифметическое отклонение профиля поверхности в 8 раз ниже, чем при распылении меди ионами Ga^+ . Также показано, что при травлении меди через тонкий слой гексакарбонила вольфрама можно добиться сниже-

ния влияния эффекта канализации на процесс ионно-лучевой обработки меди, однако степень шероховатости поверхности меди только в 2 раза ниже по сравнению с травлением без добавления прекурсоров.

Список литературы

1. Kim C., Ahn S., Jang D. Review: Developments in Micro/Nanoscale Fabrication by Focused Ion Beams // Vacuum. 2012. N. 86. P. 1014–1035.
2. Reyntjens S., Puers R. A Review of Focused Ion Beam Applications in Microsystem Technology // Journal of micromechanics and microengineering. 2001. N. 11. P. 287–300.
3. Stevie F., Shane T., Kahora P., et al. Applications of Focused Ion Beams in Microelectronics Production, Design and Development // Surface and interface analysis. 1995. N. 23. P. 61–68.
4. Foster T., Lastor D., Singh P. First Silicon Functional Validation and Debug of Multicore Microprocessors // Transactions on Very Large Scale Integration Systems. 2007. Vol. 15, N. 5. P. 495–504.
5. Chang K., Markov I., Bertacco V. Functional Design Errors in Digital Circuits. Springer, 2009. 200 p.
6. Prewett P., Heard P. Repair of Opaque Defects in Photomasks Using Focused Ion-Beams // Journal of Applied Physics. 1987. Vol. 20, N. 9. P. 1207–1209.
7. Wagner A., Levin J., Mauer J., Blauner P., et al. X-ray Mask Repair With Focused Ion Beams // Journal of Vacuum Science & Technology. 1990. N. 8. P. 138–145.
8. Liu Z., Iltanen K., Chekurov N., et al. Aluminum Oxide Mask Fabrication by Focused Ion Beam Implantation Combined With Wet Etching. // Nanotechnology. 2013. Vol. 24, N. 17. P. 281–288.
9. Mohiuddin T. Focused Ion Beam (FIB) Circuit Edit // Electronic Device Failure Analysis. 2014. N. 23. P. 20–23.
10. Martínez-Pérez M., Sesé J., Córdoba R., et al. Circuit edit of superconducting microcircuits // Superconductor Science and Technology. 2009. Vol. 22, N. 12. P. 561–564.
11. Utke I., Hoffmann P., Melngailis J. Gas-assisted Focused Electron Beam and Ion Beam Processing and Fabrication // Journal of Vacuum Science & Technology. 2008. N. 26. P. 1197–1276.
12. Schindler G., Steinlesberger G., Engelhard M., et al. Electrical Characterization of Copper Interconnects with end Of-roadmap Feature Size // Solid-State Electronics. 2003. N. 47. P. 1233–1236.
13. Volkert C., Minoret A. Focused Ion Beam Microscopy and Micromachining // Material Research Society. 2007. Vol. 32. P. 389–399.
14. Kempshall B., Schwarz S., Prentizer B. Ion Channeling Effects on the Focused Ion Beam Milling of Cu // Journal of Vacuum Science & Technology. 2001. N. 19. P. 749–754.
15. Phillips J., Griffis D., Russell P. Channeling Effects During Focused-Ion-Beam Micromachining of Copper. // Journal of Vacuum Science & Technology. 2000. N. 18. P. 1061–1065.
16. Casey J., Phaneuf M., Chandler C. Copper device editing: Strategy for focused ion beam milling of copper // Journal of Vacuum Science & Technology. 2002. N. 20. P. 2682–2685.
17. ГОСТ ИСО 25178-2—2014. Геометрические характеристики изделий (GPS). Структура поверхности. Ареал. Термины, определение и параметры структуры поверхности. Введ. 12.12.2014. М.: Стандартинформ, 2017. 47 с.

18. Конфокальный лазерный сканирующий микроскоп. VK-X100 // ЗАО "Sernia" [Официальный сайт]. URL: <http://www.dernia.ru/local/tools/download.php?file=8803>. (дата обращения: 20.04.17). С. 4.
19. Милованов Р. А., Кельм Е. А., Косичкин О. А. и др. Селективное травление меди в технологии анализа отказов ИМС с проводниками на основе меди // Нано- и микросистемная техника. 2013. № 11. С. 30–32.
20. Rue C., Shepherd R., Hallstein R. Low keV FIB Applications for Circuit Edit // Proceedings of the 33rd International Symposium for Testing and Failure Analysis. 2007. P. 312–318.

D. G. Lapin, Postgraduate Student, I. S. Ovchinnikov, Postgraduate Student, box.f2016@yandex.ru, S. V. Pakhomov, Postgraduate Student, Moscow Technological University, Moscow, 119454, Russian Federation

Corresponding author:

Ovchinnikov Ivan S., Postgraduate Student, Moscow Technological University, Moscow, 119454, Russian Federation, box.f2016@yandex.ru

Ion-Stimulated Sputtering of the Surface of the Polycrystalline Copper by High-Energy Ions of Gallium

Received on April 11, 2018

Accepted on May 11, 2018

The article is devoted to the problem of the local ion-stimulated sputtering of the surface of the polycrystalline copper by high-energy gallium ions, and influence of the effect channeling on the sputtering coefficient of the polycrystalline copper. The surface roughness of the polycrystalline copper obtained as a result of the local ion-stimulated sputtering of its surface in absence of a precursor, using water vapor (H_2O), chlorine (Cl_2) and tungsten hexacarbonyl ($W(CO)_6$), as well as current and energy ion beam, was determined.

The authors demonstrated that the minimal surface roughness was obtained when H_2O was used as a precursor, and the maximal roughness was obtained with the use of Cl_2 . It was discovered that the current and energy of the ion beam increase, when the surface roughness increases.

Keywords: circuit edit, local ion-stimulated sputtering, polycrystalline copper, nanostructuring, focused ion beam, channeling effect

For citation:

Lapin D. G., Ovchinnikov I. S., Pakhomov S. V. Ion-Stimulated Sputtering of the Surface of the Polycrystalline Copper by High-Energy Ions of Gallium, *Nano- i Mikrosistemnaya Tekhnika*, 2018, vol. 20, no. 9, pp. 528–534.

DOI: 10.17587/nmst.20.528-534

Introduction

The technology of the focused ion beam finds its applications in various branches of science and technologies [1–2]. However, it is most required in the field of analysis of failures and diagnostics of the semi-conductor structures and elements of nanoelectronics [3].

Reliability and high quality of operation of a micro-electronic product demands a special attention to the questions of diagnostics and crystal debugging at the stage of a testing manufacture [4]. In the first prototypes of IC a considerable part of errors in the design of the topology were in tracing of the interlayer connections [5]. Introduction of any changes into the topology of a ready IC envisages manufacture of new lithographic masks, which involves additional financial costs [6]. The requirement for new lithographic masks can be eliminated due to the technology of the circuit edit of

IC, one of the components of which is the method of the local ion-stimulated sputtering [7, 8]. The method allows us to introduce local changes into the electric circuit of IC without infringement of its workability [9–11]. A specific feature of the modern IC is formation of an inter-layer metallization from the polycrystalline copper [12]. An analysis [13] shows that the process of interaction of a beam of high-energy ions of gallium with the surface of the polycrystalline copper generates the channeling effect. The channeling effect has an essential impact on the process of the local ion-beam sputtering of copper. As the ion beam becomes falling in the direction of the channeling, the sputtering factor decreases [14]. Hence, the speed of sputtering of the grains of the polycrystalline copper of various crystallographic orientations will differ, which will lead to formation of an unpredicted relief of the processed surface (fig. 1).

In [15] it is demonstrated, that during the ion-beam sputtering of the amorphous copper the channeling effect does not reveal itself, and, as a consequence, the sputtering goes on with an identical speed on all the processed surface. In its turn the research presented in [16] shows that the variation of the crystal lattice of the near-surface layers of the polycrystalline copper also promotes the leveling of the speed of etching in all the area of scanning. One of the ways of amorphization of the near-surface layers of the polycrystalline copper in the course of a local ion-beam sputtering is application of the gases-precursors, which during interaction with the surface change its structure and properties. A gas-precursor is supplied into the chamber of a two-beam system to the area, in which an ion bombardment of the surface takes place.

Thus, the purpose of the given work is an analysis of the influence of the type of the gas-precursor on the result of a local ion-beam sputtering of the polycrystalline copper by high-energy ions of gallium.

Experiment

As a testing site for the research, a site of the system for metallization on the basis of the polycrystalline copper in the integrated microcircuit made by 90 nm technological process, was selected.

The method of the local ion-stimulated sputtering was realized by means of *FEI Qanta 3D* two-beam system with a gallium liquid-metal ion source. As the gases-precursors during the experiment the vapors of water (H_2O), chlorine (Cl_2) and organometallic gas — hexacarbonyl of tungsten ($W(CO)_6$) were used.

During the experiment on the site of the system of metallization by the method of the local ion-beam sputtering 64 rectangular pits were formed with the following sizes: depth — 1 μm , length — 10 μm , width 10 μm .

In the course of the experiment the following parameters were changed: the type of the gas-precursor supplied to the surface of the sample (H_2O , Cl_2 , $W(CO)_6$), the energy of the primary ions of gallium (U_{HV}) (within the range of 5...30 kV) and the current of the primary beam of ions of gallium (I_{beam}) (within the range of 24...2500 pA). Besides, the experiment was done under bombardment of the site of the surface without introduction of the precursors.

For characterizing of the result of the ion-beam etching of the polycrystalline copper, the arithmetic mean deviation of the surface profile was used (R_a), found by the following formula [17]:

$$R_a = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |y_i|, \quad (1)$$

where y_i — absolute value of the profile deviation from the average line m within the limits of the base length.

Measurement of the surface roughness was done with application of *Keyence* laser profilometer with the depth resolution of 0.5 nm [18].

Analysis of the results of the experiment

As a result of the research, the dependences of the value of the average arithmetic deviation of the surface profile, received during the copper etching, on the accelerating voltage and the current of the beam of ions, and also on the type of the used precursor, were discovered (fig. 2).

It is necessary to point out, that at considerable currents of the beam, the level of roughness of the surface increased practically several times in all the experiments. As is known, the process of the ion-stimulated etchings consists of a chemical reaction of the precursor with the sample and directly of the ion sputtering. If the current of the ion beam is about $10^{-9} A$, the process of the ion sputtering becomes prevailing, and the chemical reaction practically does not influence the target etching. Hence, the channeling effect cannot be avoided. Also, it is obvious, that the accelerating voltage influences insignificantly the value of roughness which is due to a slight increase of the sputtering coefficient of a material during an increase of the energy of the ions.

Also, the analysis of the received results of the experiment allows us to define the minimal degree of the surface roughness received as a result of the ion-beam sputtering of the polycrystalline copper during introduction of the precursors of various types (fig. 3).

The maximal level of roughness of the surface revealed itself during the ion-stimulated etching of copper with addition of Cl_2 precursor. The research of the ion-beam etching of copper in combination with application of Cl_2 was encouraged by the analysis of the positive results of a similar by its nature work [19] in the area of the plasma-chemical copper etching. However, in this case it was not possible to achieve any positive results. Most likely, this was due to the fact that in [19] the positive results were received at high temperatures ($\approx 200 ^\circ C$). In such conditions the reaction products become volatile and are removed easily from the surface by the vacuum system. Besides, it was discovered that as a result of ion etching of copper by an ion beam with addition of Cl_2 certain undesirable reaction products were formed with a low specific resistance, which could cause parasitic electric bonds in the system of the interlayer metallization of IC.

As a result of the research it was established, that during etching of the polycrystalline copper plate by Ga^+ ions the degree of roughness was insignificantly less than during etching with addition of Cl_2 precursor. Just as it was expected, this was caused by the effect of

channeling of the ions in a non-uniform crystallographic structure of a copper substrate.

A rather low degree of roughness of the copper surface (in comparison with Ga^+ and Cl_2) was received during etching of copper through the formed thin layer of tungsten (about 10 nm). A specific feature of such an approach consists in the necessity of deposition of a new layer of tungsten after each iteration of etching of copper. The decrease of the value of the surface roughness was caused by the fact that the deposited molecules of tungsten were implanted in the near-surface copper layers. This led to a variation of the lattice orientation in the near-surface layers, making its more homogeneous, and thus, leveling the speeds of etching of separate grains [16]. A drawback of such approach in comparison with etching of copper with application of water is an essential increase of the time for etching.

Use of water as a precursor allowed us to receive the minimal roughness of the surface. The reason for this was the fact, that in the course of an irradiation of the vapors of water it was decomposed into hydrogen and oxygen. In its turn, the oxygen oxidized the near-surface layer of the copper target. Hence, the ions participating in the process of etching would interact with the copper oxide, in which the channeling effect is expressed considerably less [20]. Besides, water has a high coefficient of sticking to a surface, and also allows us to raise the selectivity of etching of copper in relation to the dielectrics.

Conclusion

The research carried out in the given work allows us to make a number of conclusions. Firstly, owing to the polycrystalline structure of the copper used in the interlayer metallization of IC, the channelizing effect appears, promoting a non-uniform course of the process of the ion-beam etching. Secondly, it was established, that in case of the stimulated ion-beam etching of copper with the use of water an average arithmetic deviation of the surface profile would be 8 times lower, than in case of sputtering of copper by Ga^+ ions. It was also demonstrated, that the copper etching through a thin layer of hexacarbonyl of tungsten can promote a decrease of the influence of the channelizing effect on the process of the ion-beam processing of copper, however, the degree of roughness of the copper surface would only be 2 times lower in comparison with the etching without addition of the precursors.

References

1. Kim C., Ahn S., Jang D. Review: Developments in Micro/Nanoscale Fabrication by Focused Ion Beams, *Vacuum*, 2012, no. 86, pp. 1014–1035.
2. Reyntjens S., Puers R. A Review of Focused Ion Beam Applications in Microsystem Technology, *Journal of micromechanics and microengineering*, 2001, no. 11, pp. 287–300.
3. Stevie F., Shane T., Kahora P., et al. Applications of Focused Ion Beams in Microelectronics Production, Design and Development, *Surface and interface analysis*, 1995, no. 23, pp. 61–68.
4. Foster T., Lastor D., Singh P. First Silicon Functional Validation and Debug of Multicore Microprocessors, *Transactions on Very Large Scale Integration Systems*, 2007, vol. 15, no. 5, pp. 495–504.
5. Chang K., Markov I., Bertacco V. Functional Design Errors in Digital Circuits, *Springer*, 2009. P. 200.
6. Prewett P., Heard P. Repair of Opaque Defects in Photomasks Using Focused Ion-Beams. *Journal of Applied Physics*, 1987, vol. 20, no. 9, pp. 1207–1209.
7. Wagner A., Levin J., Mauer J., Blauner P., et al. X-ray Mask Repair With Focused Ion Beams, *Journal of Vacuum Science & Technology*, 1990, no. 8, pp. 138–145.
8. Liu Z., Iltnen K., Chekurov N., et al. Aluminum Oxide Mask Fabrication by Focused Ion Beam Implantation Combined With Wet Etching, *Nanotechnology*, 2013, vol. 24, no. 17, pp. 281–288.
9. Mohiuddin T. Focused Ion Beam (FIB) Circuit Edit, *Electronic Device Failure Analysis*, 2014, no. 23, pp. 20–23.
10. Martínez-Pérez M., Sesé J., Córdoba R., et al. Circuit edit of superconducting microcircuits, *Superconductor Science and Technology*, 2009, vol. 22, no. 12, pp. 561–564.
11. Utke I., Hoffmann P., Melngailis J. Gas-assisted Focused Electron Beam and Ion Beam Processing and Fabrication, *Journal of Vacuum Science & Technology*, 2008, no. 26, pp. 1197–1276.
12. Schindler G., Steinlesberger G., Engelhard M., et al. Electrical Characterization of Copper Interconnects with end Of-roadmap Feature Size, *Solid-State Electronics*, 2003, no. 47, pp. 1233–1236.
13. Volkert C., Minoret A. Focused Ion Beam Microscopy and Micromachining, *Material Research Society*, 2007, vol. 32, pp. 389–399.
14. Kempshall B., Schwarz S., Prentizer B. Ion Channeling Effects on the Focused Ion Beam Milling of Cu, *Journal of Vacuum Science & Technology*, 2001, no. 19, pp. 749–754.
15. Phillips J., Griffis D., Russell P. Channeling Effects During Focused-Ion-Beam Micromachining of Copper, *Journal of Vacuum Science & Technology*, 2000, no. 18, pp. 1061–1065.
16. Casey J., Phaneuf M., Chandler C. Copper device editing: Strategy for focused ion beam milling of copper, *Journal of Vacuum Science & Technology*, 2002, no. 20, pp. 2682–2685.
17. Gost ISO 25178-2–2014. Geometricheskie harakteristiki izdelij (GPS). Struktura poverhnosti. Areal. Terminy, opredelenie i parametry struktury poverhnosti. Vved. 12.12.2014, Moscow, Standartinform, 2017, 47 p. (in Russian).
18. Konfokal'nyj lazernyj skanirujushhij mikroskop. VK-X100, ZAO "Sernia" [Oficial'nyj sajt]. URL: <http://www.dernia.ru/local/tools/download.php?file=8803>. (data access: 20.04.17), 4 p. (in Russian).
19. Milovanov R. A., Kel'm E. A., Kosichkin O. A., et al. Selekktivnoe travlenie medi v tehnologii analiza otkazov IMS s provodnikami na osnove medi, *Nano- i mikrosistemnaya tekhnika*, 2013, no. 11, pp. 30–32 (in Russian).
20. Rue C., Shepherd R., Hallstein R. Low keV FIB Applications for Circuit Edit., *Proc. of the 33rd International Symposium for Testing and Failure Analysis*, 2007, pp. 312–318.

В. Е. Пауткин, канд. техн. наук, гл. специалист, **Ф. А. Абдуллин**, инженер-конструктор,
А. Е. Мишанин, вед. инженер-технолог,
Акционерное общество "Научно-исследовательский институт физических измерений", г. Пенза,
e-mail: inercial@niifi.ru

ИССЛЕДОВАНИЕ СТЕНОК ВЕРТИКАЛЬНЫХ КРЕМНИЕВЫХ СТРУКТУР, СФОРМИРОВАННЫХ МЕТОДАМИ ГЛУБОКОГО BOSCH-ТРАВЛЕНИЯ

Поступила в редакцию 06.04.2018

Рассмотрены особенности процесса Bosch-травления. Приведены результаты исследований поверхностей, сформированных методом Bosch-травления кремниевых микроструктур, до и после химической полировки. Оценка полученных профилограмм травленых поверхностей показывает уменьшение параметров шероховатости (R_a , R_z) в среднем на 20...24 % после обработки в полирующем травителе.

Ключевые слова: МЭМС-структура, Bosch-процесс, объемная микрообработка, шероховатость, химическая полировка

Введение

Широкое использование кремния как конструкционного материала при создании датчиков различного назначения связывают с появлением статьи К. Петерсена "Кремний как механический материал", опубликованной в 1982 г. [1]. Это способствовало развитию нового направления в технологии создания датчиков, получившего название МЭМС-технологии или технологии кремниевой микромеханики — создание чувствительных элементов датчиков на основе объемной и поверхностной микрообработки кремния [2, 3]. Она основана на стандартных технологических операциях, применяемых при изготовлении интегральных микросхем (ИМС) — окислении, диффузии примеси, фотолитографии и т. д. Наряду с этим в последнее время прогресс в развитии технологий микромеханики связывают с усовершенствованием технологий "сухого" травления кремния с получением структур с высоким аспектным отношением, прежде всего это технологии плазменного травления: реактивного ионно-плазменного травления (РИПТ), Bosch-процесса и др. [4, 5]. Указанные процессы позволяют проводить травление кремния на большие глубины с сохранением вертикального профиля травления, формировать топологию рисунка произвольной формы, чем отличаются от процессов анизотропного травления, где формируемые стенки структур задаются кристаллографической структурой кремния. Однако в отличие от процессов анизотропного травления, характеризующихся возможностью формирования стенок кремниевых структур с атомарно гладкими поверхностями [6, 7], методами плазменного травления формируются структуры с более грубыми боковыми стенками. Этот аспект важен для микромеханических приборов, так как может вызывать дополнительные по-

терии энергии в чувствительных элементах датчиков при их функционировании [8]. Таким образом, задача совершенствования процессов плазменного травления при формировании кремниевых структур является актуальной для создания совершенных микромеханических приборов.

Теоретическая часть

Для формирования чувствительных элементов микромеханических датчиков необходима разработка специальных технологических процессов. При этом технологические процессы должны обеспечивать:

- высокую управляемую скорость травления;
- возможность управления профилем травления;
- высокую селективность обрабатываемых материалов;
- качественную морфологию формируемых поверхностей и отсутствие нарушений, вызываемых травлением;
- изготовление микроструктур с высоким аспектным отношением и большой глубиной.

На технологический процесс плазменного травления влияют следующие параметры: давление в рабочей камере; частота ВЧ- поля; мощность; скорость потока технологических газов; температура процесса; геометрия реактора и др. Комбинируя перечисленные выше параметры, можно добиться высокой селективности обрабатываемых материалов, высокой скорости травления кремния, максимально приблизить профиль травления к вертикальному [9].

В настоящее время при формировании МЭМС-структур одним из распространенных методов формирования высокоаспектных структур является Bosch-процесс — процесс травления с перемен-

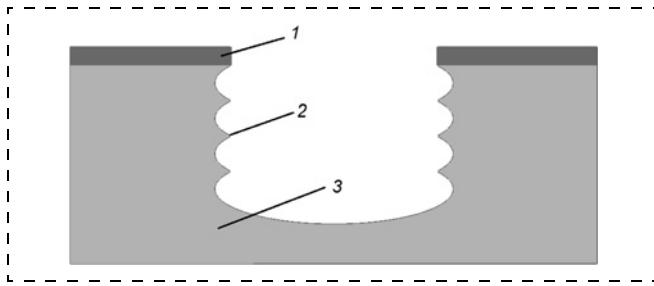


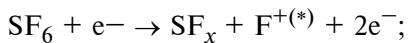
Рис. 1. Микронеровности ("скаллопы") на боковых стенках формируемых кремниевых структур: 1 — маска; 2 — "скаллоп"; 3 — кремниевая пластина

Fig. 1. Microroughnesses (scallops) on the lateral walls of the formed silicon structures: 1 — mask; 2 — scallops; 3 — silicon plate

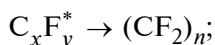
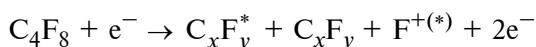
ной модуляцией газа. В данном процессе применяется объединенная плазма фтора (SF_6) и фторуглерода (C_4F_8). Последняя служит для пассивации боковых стенок и повышения селективности травления.

Формирование профиля травления упрощенно можно изобразить следующими стадиями:

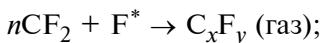
- расщепление SF_6 в высокоплотной плазме с образованием свободных радикалов фтора:



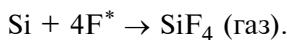
- образование октофторциклогубтана и пассивация им поверхности боковых стенок:



- травление полимера $(CF_2)_n$ радикалами фтора с образованием летучего соединения C_xF_y :



- травление кремния радикалами фтора с удалением летучего SiF_4 :



Полный цикл процесса повторяется много раз, обеспечивая травление кремния на глубину. Как было отмечено выше, методом плазменного травления свойственно формирование структур с более грубыми боковыми стенками. Недостатком Bosch-процесса является выраженная шероховатость боковых стенок ("скаллопы", *scallop*), образующаяся в виде раковин после каждого шага травления (рис. 1).

Вопросы улучшения Bosch-процесса травления являются ключевыми при формировании кремниевых микроструктур с высоким аспектным отношением. Вопросам совершенствования технологии и зависимости получаемых результатов от применяемых технологических режимов посвящен ряд

работ. Например, рассматривалось качество формируемых вертикальных боковых стенок в зависимости от аспектного отношения [10], технология формирования боковых вертикальных стенок, свободных от микронеровностей, путем управления такими параметрами технологического процесса, как мощность ВЧ-источника, расход газов, время пассивации, время травления, давление в реакторе [11, 12], влияние "скаллопов" на параметры формируемых устройств [13]. Для получения достоверных практических результатов проводится моделирование плазмохимических процессов [14, 15]. Отмечается, что возможными причинами микронеровностей в виде "скаллопов" могут быть подтравы под маску [12, 16].

Таким образом, существует необходимость поиска эффективных вариантов уменьшения шероховатости поверхности боковых стенок микроструктур, полученных методами плазменного травления.

Изготовление и исследование микроструктур

Для изготовления микроструктур использовали пластины монокристаллического кремния КДБ-0,03 толщиной 380 ± 10 мкм. Пластины проходили стандартную химическую обработку типа RCA для удаления с их поверхности органических и неорганических загрязнений, ионов металлов и пр. Предварительно пластины утоняли с непланарной стороны до толщины 140 ± 10 мкм методом анизотропного травления в растворе гидроксида калия KOH, используя режимы, аналогичные приведенным в работах [17, 18].

Далее пластины окисляли в диффузионной системе типа СДО для создания на их поверхности защитного слоя оксида кремния. После этого на защитном слое диоксида кремния проводили операции фотолитографии по формированию тестовой топологии рисунка для проведения процесса плазмохимического травления. Схематично изображение подготовленной пластины представлено на рис. 2.

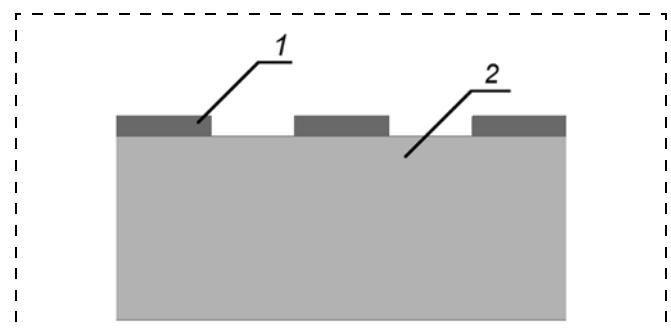


Рис. 2. Пластина с топологическим рисунком для формирования тестовых микроструктур: 1 — маска; 2 — кремниевая пластина

Fig. 2. A plate with a topological drawing for formation of the test microstructures: 1 — mask; 2 — silicon plate

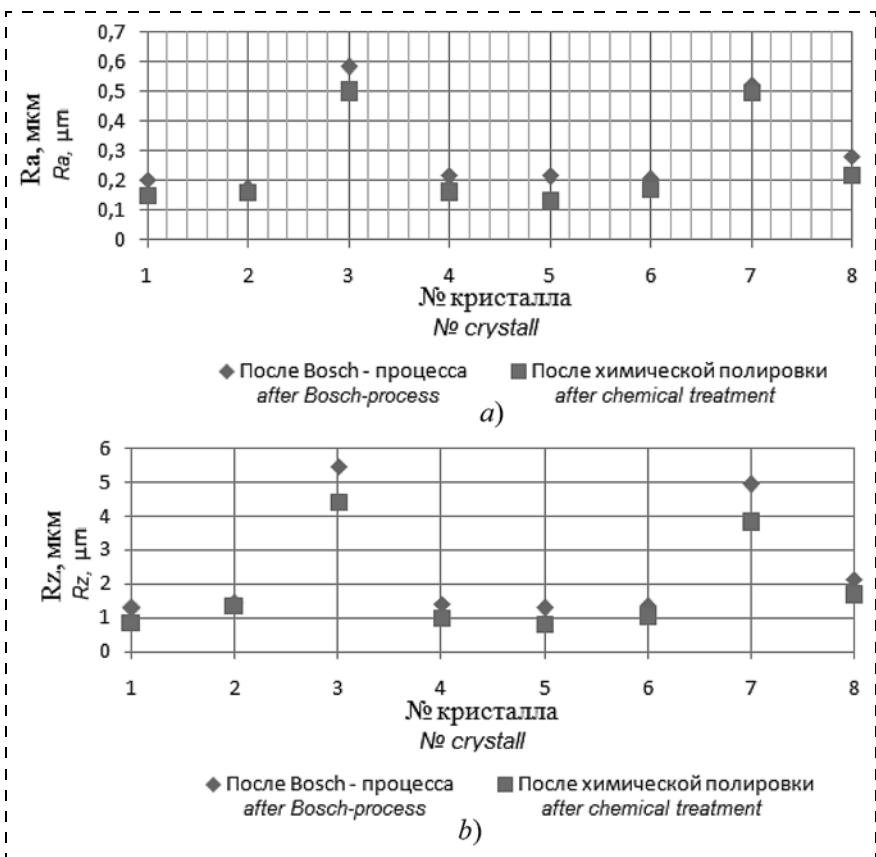


Рис. 3. Параметры поверхностей (R_a , R_z) исследуемых структур до химической полировки (a) и после химической полировки (b)

Fig. 3. Parameters of the surfaces (R_a , R_z) of the investigated structures before the chemical polishing (a), and after the chemical polishing (b)

Процесс плазмохимического травления кремниевых пластин проводили на установке плазмохимического травления в индуктивно-связанной плазме SI 500 PTSA Plasma Etcher производства SENTECH Instruments GmbH (Германия) в разряде индуктивно-связанной плазмы высокой плотности (13,56 МГц) на изолированном охлаждающим электроде (до -30°C) при рабочих давлениях 4...5 Па.

После замера параметров поверхности боковых стенок микроструктуры были подвергнуты химической полировке — обработке в изотропном травителе со-стаба $\text{HF} : \text{HNO}_3 : \text{CH}_3\text{COOH}$ в течение промежутка времени, не превышающего 1 мин, после чего проводили повторные исследования параметров боковых стенок.

Результаты проведенных исследований представлены в таблице и на рис. 3—6 (рис. 6 см. на третьей стороне обложки).

Как видно из приведенных данных, параметры R_a , R_z травленых поверхностей уменьшаются при

Результаты проведенных исследований Results of the implemented research

№ пластин Numbers of the plates	Первая группа пластин (после Bosch-процесса) <i>The first group of plates (after the Bosch process)</i>		Вторая группа пластин (после Bosch-процесса и химической полировки) <i>The second group of plates (after the Bosch process and chemical polishing)</i>		Уменьшение параметров, % <i>Reduction of the parameters, %</i>	
	R_a , μm	R_z , μm	R_a , μm	R_z , μm	R_a	R_z
1	0,2	1,29	0,15	0,848	25,00	34,26
2	0,172	1,42	0,158	1,37	8,14	3,52
3	0,582	5,46	0,498	4,42	14,43	19,05
4	0,216	1,4	0,156	1,00	27,78	28,57
5	0,216	1,29	0,125	0,798	42,13	38,14
6	0,204	1,33	0,168	1,01	17,65	24,06
7	0,523	4,93	0,494	3,79	5,54	23,12
8	0,281	2,13	0,216	1,65	23,13	22,54
Средние значения Average values	0,299	2,406	0,246	1,861	20,48	24,16

Травление кремния проводили в высокоплотной плазме $\text{SF}_6 + \text{C}_4\text{F}_8$ (Bosch-процесс) на всю глубину пластин. Скорость травления при этом составляла 2...4 мкм/мин. Изготовленные микроструктуры были выделены из объема пластин для исследования и оценки параметров поверхности их боковых стенок. Исследования вертикальных стенок проводили на оптическом профилографе-профилометре PF-60 (Mitaka, Япония) с оценкой параметров поверхности R_a , R_z .

При проведении измерений задавали следующие параметры:

- базовая длина 0,08 мм;
- длина оценки 0,4 мм;
- полная длина трассировки 0,5 мм;
- шаг (*pitch*) 0,2 мкм;
- 50 %-ный Гауссов фазокорректированный фильтр;
- выходные данные по ГОСТ Р ИСО 4287:1997.

После замера параметров поверхности боковых стенок микроструктуры были подвергнуты химической полировке — обработке в изотропном травителе со-

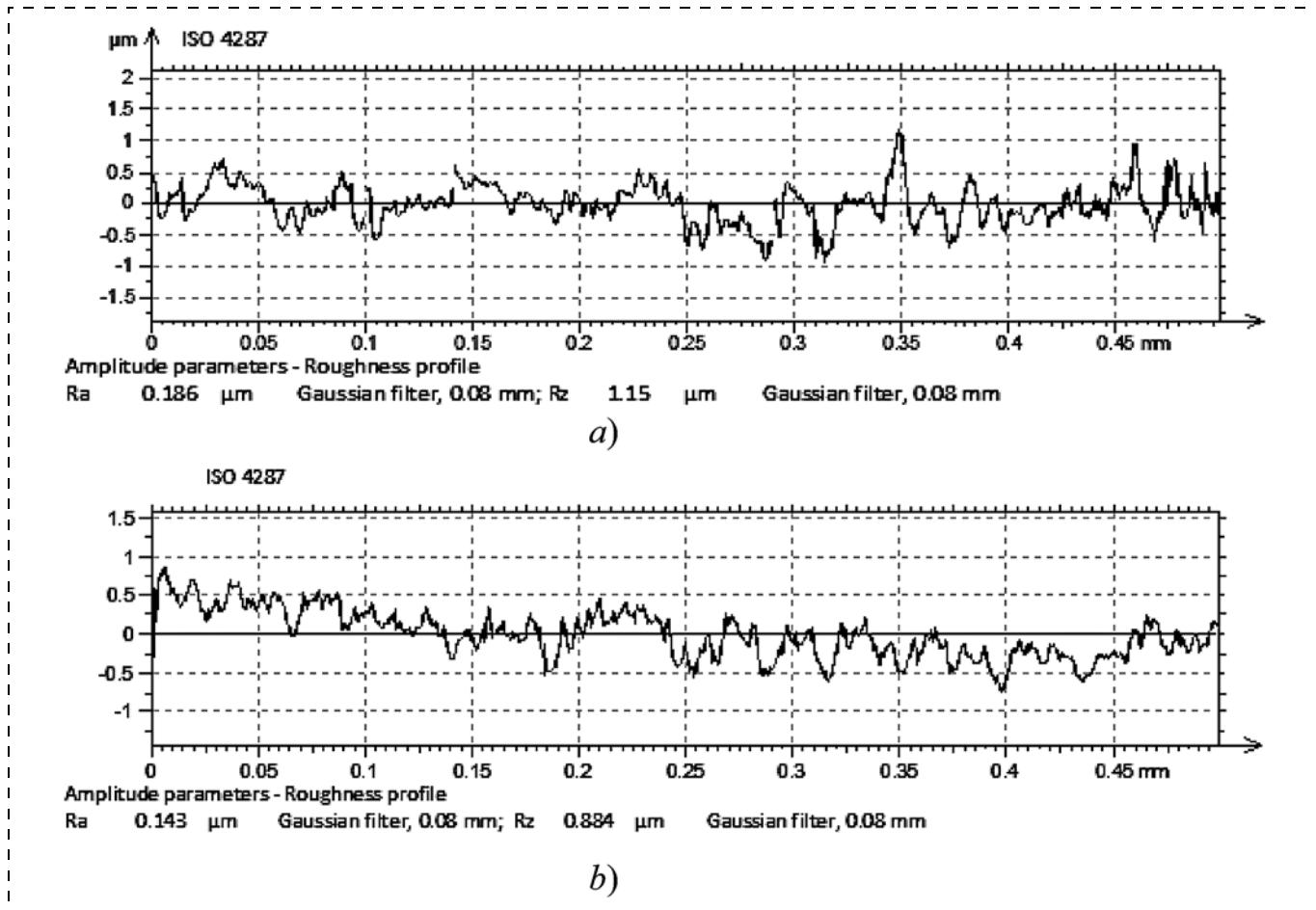


Рис. 4. Примеры профилограмм исследуемых травленых поверхностей кремния до химической полировки (а) и после химической полировки (б)

Fig. 4. Examples of the profilograms of the etched surfaces of silicon before the chemical polishing (a), and after the chemical polishing (b)

обработке в полирующем травителе. Для параметра шероховатости Ra это уменьшение оценивается в среднем на 20,48 % (для проведенных измерений на восьми образцах), для параметра шероховатости

Rz уменьшение оценено на 24,16 % (для проведенных измерений на восьми образцах).

Заключение

Проведенные исследования поверхностей сформированных кремниевых микроструктур показывают, что химическое полирование может являться эффективным решением уменьшения шероховатости поверхности боковых стенок, полученных Bosch-процессом [19].

На практике, сочетая преимущества глубокого плазменного травления, а именно возможность формирования топологии структур произвольной формы, с технологией химического полирования, возможно получить совершенные кремниевые структуры микромеханических датчиков.

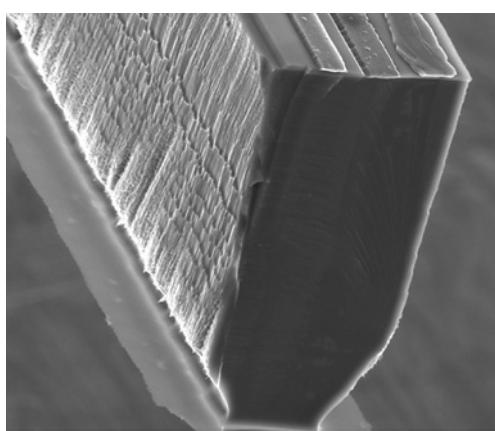


Рис. 5. Электронная фотография полученных микроструктур (сканирующий электронный микроскоп JSM – 6610LV)

Fig. 5. Electron photo of the microstructures (JSM – 6610LV scanning electron microscope)

Список литературы

1. Peterson K. E. Silicon as a mechanical material // Proc. IEEE. 1982. Vol. 70. P. 420–457.
2. Гольцова М. М., Юдинцев В. А. МЭМС: большие рынки малых устройств // Нано- и микросистемная техника. 2008. № 4. С. 9–13.

3. Соколов Л. В., Жуков А. А., Парфенов Н. М., Ануров А. Е. Анализ современных технологий объемного микропрофилирования кремния для производства чувствительных элементов датчиков и МЭМС // Нано- и микросистемная техника. 2014. № 10. С. 27–35.
4. Bo Yang, Yumei Guan, Shourong Wang, Qi Zou, Xian Chu and Haiyan Xue. A New Hybrid Gyroscope with Electrostatic Negative Stiffness Tuning // Sensors. 2013. № 13. Р. 7121–7139; doi:10.3390/s130607121.
5. Соколов Л. В., Парфенов Н. М. Технологические особенности формирования трехмерных МЭМС // Нано- и микросистемная техника. 2011. № 11. С. 19–26.
6. Zubel I., Kramkowska M. The effect of isopropyl alcohol on etching rate and roughness of (100) Si surface etched in KOH and TMAH solutions / Sensors and Actuators A: Physical, 2001. A 93. P. 138–147.
7. Krause P., Obermeier E. Etch rate and surface roughness of deep narrow U-grooves in (110)-oriented silicon / J. Micro-mech. Microeng. 1995. № 5. Р. 112–114.
8. Филонов О. М. О диссипации кинетической энергии в упругих элементах микромеханических датчиков // Датчики и системы. 2002. № 9. С. 10–13.
9. Галперин В. А., Данилкин Е. В., Мочалов А. И. Процессы плазменного травления в микро- и нанотехнологиях: учеб. пособие / под ред. С. П. Тимошенкова. М.: Бином. Лаборатория знаний, 2010. 283 с.
10. Pike W. T., Karl W. J., Kumar S., et al. Analysis of sidewall quality in through-wafer deep reactive-ion etching // Microelectronic Engineering. 2004. N. 73–74. P. 340–345.
11. Voss L. F., Qinghui Shao, Conway A. M., et al. Smooth Bosch etch for improved Si diodes // IEEE Electronic Device Letter, June 14, 2013. P. 1226–1228.
12. Ануров А. Е., Заботин Ю. М., Подгордецкий С. Г. Особенности процесса глубинного анизотропного травления кремния в технологии изготовления траншейных МОП-транзисторов // Ракетно-космическое приборостроение и информационные системы. 2015. Т. 2. Вып. 4. С. 66–73.
13. Filipovic L., Lacerda de Orio R., Selberherr S. Effects of Sidewall Scallops on the Performance and Reliability of Filled Copper and Open Tungsten TSVs // 2014 IEEE 21st International Symposium on the Physical and Failure Analysis of Integrated Circuits (IPFA). Р. 321–326.
14. Шумилов А. С., Амиров И. И., Лукичев В. Ф. Моделирование профиля травления высокоаспектных канавок в Si в хлорной плазме // Микроэлектроника. 2017. Т. 46, № 5. С. 323–331.
15. Шумилов С. А., Амиров И. И., Лукичев В. Ф. Моделирование эффектов формирования глубоких канавок в кремнии в плазмохимическом циклическом процессе // Микроэлектроника. 2009. Т. 38, № 6. С. 428–435.
16. Postnikov A. V., Amirov I. I., Naumov V. V., Kalnov V. A. Simulation, fabrication, and dynamics characteristics of electrostatically actuated switches // Proc. SPIE. 7025, Micro- and Nanoelectronics, 2007, 70251H (29 April 2008); doi:10.1117/12.802502.
17. Готра З. Ю. Технология микроэлектронных устройств: Справочник. М.: Радио и связь, 1991. 528 с.
18. Пауткин В. Е., Абдуллин Ф. А. Влияние предварительной химической очистки на морфологию травленой поверхности кремния в растворе гидроксида калия // Приборы. 2017. № 2 (200). С. 34–38.
19. Патент РФ № 2625248 МПК H01L 21/308. Способ изготовления кристаллов микроэлектромеханических систем / В. Е. Пауткин, А. Е. Мишанин, И. Р. Вергазов // Бюл. № 20 от 12.07.2017.

V. E. Pautkin, Candidate of Technical Sciences, Chief Specialist, inercial@niifi.ru,
F. A. Abdullin, Design-Engineer, **A. E. Mishanin**, Leading Engineer-Technologist,
Research Institute of Physical Measurements, Penza, 440026, Russian Federation

Corresponding author:

Abdullin Farhad A., Design-Engineer, Research Institute of Physical Measurements, Penza, 440026, Russian Federation, inercial@niifi.ru

Investigation of the Walls of the Vertical Silicon Structures Formed by the Methods of Deep Bosch Process

Received on April 06, 2018
Accepted on April 25, 2018

At present, the technological processes of vacuum-plasma etching are widely used for manufacturing of the three-dimensional silicon microelectromechanical systems (MEMS) with a high aspect ratio. One of the versions of such processes is the Bosch process. The Bosch process, or a process with variable gas modulation, allows a silicon etching to be done to a great depth with preservation of a vertical etching profile. In this process, a combined fluorine plasma (SF_6) and fluorocarbon (C_4F_8) are used. The latter ensures passivation of the side walls and a better selectivity of etching. The advantages of the process are the following: the process can be conducted at a room temperature, the structures can be obtained with a high aspect ratio, up to 30:1, photoresist selectivity can be high (about 80:1 and over), the etch rate is up to 20 $\mu\text{m}/\text{min}$, and a controlled etching profile is possible. The disadvantage of the process is the pronounced roughness of the side walls, which is associated with the cyclicity of the process. This work presents investigations of the surfaces of the silicon microstructures formed by the Bosch etching method before and after a chemical treatment in a polishing isotropic etchant of the composition of $HF:HNO_3:CH_3COOH$. An evaluation of the etched surfaces obtained by the profilograms shows that the parameters of R_a , R_z decrease, when treated in a polishing etchant. For the roughness parameter of R_a this decrease is estimated on average as 20.48 % (for the measurements made on eight samples), for the roughness parameter of R_z , the reduction value is estimated as 24.16 % (for the measurements made on eight samples). Investigations of the surfaces of the formed silicon microstructures indicate that the chemical polishing can be an effective solution for reduction of the surface roughness of the side walls obtained by the Bosch process.

Keywords: MEMS structure, Bosch process, surface microprocessing, roughness, chemical polishing

For citation:

Pautkin V. E., Abdullin F. A., Mishanin A. E. Investigation of the Walls of the Vertical Silicon Structures Formed by the Methods of Deep Bosch Process, *Nano- i Mikrosistemnaya Tekhnika*, 2018, vol. 20, no. 9, pp. 535–542.

DOI:10.17587/nmst.20.535-542

Introduction

The wide use of silicon as a constructional material for development of different-purpose sensors is usually connected with appearance of an article by K. Petersen [1]. It promoted development of a new direction in the technology for creation of the sensors, which got the name of MEMS technology or technology of silicon micromechanics — development of the sensitive elements on the basis of the volume and surface microprocessing of silicon [2, 3]. It is based on the standard technological operations applied for manufacturing of the integrated microcircuits (IC) — oxidation, diffusion of impurity, photolithography, etc. Alongside with this, the progress in development of the micromechanic technologies is connected with improvement of the technologies of "dry" etching of silicon with obtaining of the structures with a high aspect relation, first of all, these are the technologies of plasma etching: reactive ion-plasma etching (RIPE), Bosch process, etc. [4, 5]. The above processes allow us to implement silicon etching to bigger depths with preservation of the vertical profile of etching, and to form topology of a drawing of an arbitrary form, which is different from the processes of anisotropic etching, where the formed walls of the structures are set by the crystallographic structure of the silicon. However, unlike the processes of the anisotropic etching characterized by a possibility of formation of the walls of the silicon structures with the atomic smooth surfaces [6, 7], the methods of plasma etching form the structures with rougher lateral walls. This aspect is important for the micromechanical devices, because it can cause additional losses of energy in the sensors during their functioning [8]. Thus, the problem of improvement of the processes of plasma etching during formation of the silicon structures is topical for development of perfect micromechanical devices.

Theoretical part

Formation of the sensitive elements for the micro-mechanical sensors requires development of special technological processes. At that, they should ensure:

- High controlled speed of etching;
- Possibility of control of the etching profile;
- High selectivity of the processed materials;
- Quality morphology of the formed surfaces and absence of the defects caused by etching;
- Manufacturing of the microstructures with a high aspect relation and big depth.

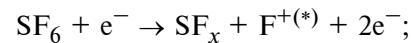
The process of plasma etching is influenced by the following parameters: pressure in the working chamber;

frequency of the high-frequency field; power; speed of the flow of the technological gases; the temperature process; the geometry of a reactor, etc. By combining the above parameters it is possible to achieve a high selectivity of the processed materials, a high speed of etching of silicon, and bring the etching profile as much as possible closer to the vertical one [9].

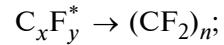
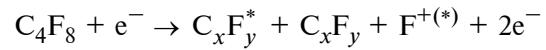
During formation of the MEMS structures one of the widespread methods of formation of the high-aspect structures is the Bosch process — the process of etching with a variable modulation of gas. It applies integrated plasma of fluorine (SF_6) and fluorocarbon (C_4F_8). The later serves for passivation of the lateral walls and higher of the selectivity of etching.

In a simplified form, formation of the etching profile can be represented by the following stages:

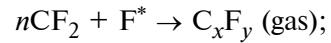
- Splitting of SF_6 in a high density plasma with formation of free radicals of fluorine



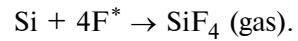
- Formation of octofluorocyclobutane and passivation of the surface of the lateral walls by it



- Etching of the polymer $(CF_2)_n$ by fluorine radicals with formation of a volatile compound of C_xF_y



- Etching of silicon by the radicals of fluorine with removal of volatile SiF_4



The full cycle of the process is repeated many times, ensuring a certain depth of the silicon etching. As it was mentioned above, the methods of plasma etching are characterized by formation of the structures with rougher lateral walls.

A drawback of the Bosch process is a pronounced roughness of the lateral walls (scallops), formed in the shape of bowls after each step of etching (fig. 1).

The questions of improvement of the Bosch process of etching are the key ones in formation of the silicon microstructures with a high aspect relation. Many works are devoted to the questions of improvement of the technology and to dependence of the results on the applied technological modes. For example, among them are the works devoted to the formed vertical lat-

eral walls depending on the aspect relation [10], the technology for formation of the lateral vertical walls, free from microroughnesses due to control of such parameters of the technological process as the power of the high frequency source, gas flow rate, passivation time, etching time, pressure in the reactor [11, 12], influence of the scallops on the parameters of the formed devices [13]. For obtaining of reliable practical results a modeling of the plasma-chemical processes [14, 15] is done. It is pointed out, that a possible reason for microroughnesses in the form of the scallops can be etch undercutting under a mask [12, 16].

Thus, there is a necessity for search of effective ways to reduce the roughness of the surface of the lateral walls of the microstructures received by the plasma etching methods.

Manufacture and research of the microstructures

For manufacture of the microstructures the KDB-0.03 monocrystalline silicon plates were used with thickness of $380 \pm 10 \mu\text{m}$. The plates were subjected to the standard chemical processing of RCA type for removal of the organic and inorganic pollutions, ions of metals, etc. from their surfaces. First of all, the plates were thinned from the nonplanar side down to the thickness of $140 \pm 10 \mu\text{m}$ by the method of anisotropic etching in the solution of potassium hydroxide KOH, using the modes similar to the ones presented in [17, 18].

Then the plates were oxidized in a diffusion system SOD for creation of a protective layer of silicon oxide on their surface. After that photolithography operations were done on the protective layer of the silicon dioxide for formation of the test topology of a drawing for the process of the plasma-chemical etching. A schematic image of the prepared plate is presented in fig. 2.

The process of the plasma-chemical etching was done on SI 500 PTSA Plasma Etcher installation in the inductive-bound plasma from SENTECH Instruments GmbH (Germany) in the discharge of the inductive-bound plasma of high density (13.56 MHz) on an insulated cooled electrode (down to -30°C) at the working pressures of 4...5 Pa.

Silicon etching was done in a high density plasma of $\text{SF}_6 + \text{C}_4\text{F}_8$ (Bosch process) to all the depths of the plates. The speed of etching was 2...4 $\mu\text{m}/\text{min}$. The manufactured microstructures were sorted out from the volume of the plates for research and estimation of the parameters of the surfaces of their lateral walls. The research of the vertical walls was done on PF-60 optical profilograph-profilometer (Mitaka, Japan) with estimation of the surface parameters of R_a , R_z .

During the measurements the following parameters were set:

- base length — 0.08 mm;
- estimation length — 0.4 mm;

- full trace length — 0.5 mm;
- step (*pitch*) 0.2 μm ;
- 50 % gauss phase-corrected filter;
- the output data in accordance with GOST R ISO — 4287:1997.

After the measurement of the parameters of the surface of the lateral walls the microstructures were subjected to a chemical polishing — processing in the isotropic etchant of $\text{HF}:\text{HNO}_3:\text{CH}_3\text{COOH}$ during the period of time not exceeding 1 min., and then the research of the parameters of the lateral walls was repeated.

The results of the implemented research are presented in the table and fig. 3–6 (fig. 6 see on the 3rd side of cover).

As it is apparent from the data, R_a , R_z of the etched surfaces decrease during processing in the polishing etcher. For the roughness parameter of R_a this reduction is estimated on average as 20.48 % (for measurements of eight samples), for the roughness parameter of R_z the value of the reduction is estimated as 24.16 % (for measurements of eight samples).

Conclusion

The carried out research of the surfaces of the formed silicon microstructures demonstrates, that the chemical polishing can be an effective solution for reduction of the surface roughness of the lateral walls received by the Bosch process [19].

In practice, by combining the advantages of the deep plasma etching, namely, a possibility of formation of the topology of the structures of an arbitrary form, with the technology of the chemical polishing, we can receive perfect silicon structures for the micromechanical sensors.

References

1. Peterson K. E. Silicon as a mechanical material, *Proc. IEEE*, 1982, vol. 70, pp. 420–457.
2. Golcova M. M., Judincev V. A. MEMS: bolshie rynki malyh ustrojstv, *Nano- i mikrosistemnaya tekhnika*, 2008, no. 4, pp. 9–13 (in Russian).
3. Sokolov L. V., Zhukov A. A., Parfenov N. M., Anurov A. E. Analiz sovremennoy tehnologiy obemnogo mikroprofilirovaniya kremnija dlja proizvodstva chuvstvitelnyh elementov datchikov i MEMS, *Nano- i mikrosistemnaya tekhnika*, 2014, no. 10, pp. 27–35 (in Russian).
4. Bo Yang, Yumei Guan, Shourong Wang, Qi Zou, Xian Chu and Haiyan Xue. A New Hybrid Gyroscope with Electrostatic Negative Stiffness Tuning, *Sensors*, 2013, no. 13, pp. 7121–7139; doi:10.3390/s130607121.
5. Sokolov L. V., Parfenov N. M. Tehnologicheskie osobennosti formirovaniya trehmernyh MEMS, *Nano- i mikrosistemnaya tekhnika*, 2011, no. 11, pp. 19–26 (in Russian).
6. Zubel I., Kramkowska M. The effect of isopropyl alcohol on etching rate and roughness of (100) Si surface etched in KOH and TMAH solutions, *Sensors and Actuators*, A: Physical, A 93, 2001. P. 138–147.

7. Krause P., Obermeier E. Etch rate and surface roughness of deep narrow U-grooves in (110)-oriented silicon, *J. Micro-mech. Microeng.*, 1995, no. 5, pp. 112–114.
8. Filonov O. M. O dissipacii kineticheskoy energii v uprugikh elementah mikromehanicheskikh datchikov, *Datchik i sistemy*, 2002, no. 9, pp. 10–13 (in Russian).
9. Galperin V. A., Danilkin E. V., Mochalov A. I. Processy plazmennogo travleniya v mikro- i nanotekhnologijah: uchebnoe posobie, red. S. P. Timoshenkov. Moscow, Binom. Laboratoriya znanij, 2010. 283 p. (in Russian).
10. Pike W. T., Karl W. J., Kumar S., et al. Analysis of side-wall quality in through-wafer deep reactive-ion etching, *Microelectronic Engineering*, 2004, no. 73–74, pp. 340–345.
11. Voss L. F., Qinghui Shao, Conway A. M., et al. Smooth Bosch etch for improved Si diodes, *IEEE Electronic Device Letter*, 2013, June 14, pp. 1226–1228.
12. Anurov A. E., Zabotin Ju. M., Podgorodeckij S. G. Osobennosti processa glubinnogo anizotropnogo travlenija kremnija v tehnologii izgotovlenija transhejnyh MOP-tranzistorov, *Raketno-kosmicheskoe priborostroenie i informacionnye sistemy*, 2015, vol. 2, iss. 4, pp. 66–73 (in Russian).
13. Filipovic L., Lacerda de Orio R., Selberherr S. Effects of Sidewall Scallops on the Performance and Reliability of Filled Copper and Open Tungsten TSVs, *2014 IEEE 21st International Symposium on the Physical and Failure Analysis of Integrated Circuits (IPFA)*, pp. 321–326.
14. Shumilov A. S., Amirov I. I., Lukichev V. F. Modelirovaniye profilja travlenija vysokoaspektnyh kanavok v Si v hlornoj plazme, *Mikroelektronika*, 2017, vol. 46, no. 5, pp. 323–331 (in Russian).
15. Shumilov S. A., Amirov I. I., Lukichev V. F. Modelirovaniye jeffektov formirovaniya glubokih kanavok v kremnii v plazmohimicheskem ciklicheskom processe, *Mikroelektronika*, 2009, vol. 38, no. 6, pp. 428–435 (in Russian).
16. Postnikov A. V., Amirov I. I., Naumov V. V., Kalnov V. A. Simulation, fabrication, and dynamics characteristics of electrostatically actuated switches, *Proc. SPIE. 7025, Micro- and Nanoelectronics 2007*, 70251H (29 April 2008); doi: 10.1117/12.802502.
17. Gotra Z. Ju. *Tehnologija mikroelektronnyh ustrojstv: spravochnik*, Moscow, Radio i svjaz, 1991, 528 p. (in Russian).
18. Pautkin V. E., Abdullin F. A. Vlijanie predvaritelnoj himicheskoy ochistki na morfologiju travlenoj poverhnosti kremnija v rastvore gidroksida kalija, *Pribory*, 2017, no. 2 (200), pp. 34–38 (in Russian).
19. Patent RF № 2625248 MPK N01L 21/308. Sposob izgotovlenija kristallov mikroelektromehanicheskikh sistem / V. E. Pautkin, A. E. Mishanin, I. R. Vergazov, Bjul. № 20 ot 12.07.2017 (in Russian).

УДК 661.571.1+539.23+621.3.049.771+681.586

DOI: 10.17587/nmst.20.542-554

В. Ю. Васильев, д-р хим. наук, проф., e-mail: vasilev@corp.nstu.ru,
Новосибирский государственный технический университет, зам. ген. директора, ООО "СибИС",
г. Новосибирск

ТЕХНОЛОГИИ ПОЛУЧЕНИЯ ТОНКИХ ПЛЕНОК НИТРИДА КРЕМНИЯ ДЛЯ МИКРОЭЛЕКТРОНИКИ И МИКРОСИСТЕМНОЙ ТЕХНИКИ. ЧАСТЬ 3. ПЛАЗМОАКТИВИРОВАННЫЕ ПРОЦЕССЫ В ПРОТОЧНЫХ РЕАКТОРАХ

Поступила в редакцию 22.05.2018

В части 3 обзора проанализированы технологии получения низкотемпературных кремний-азот-водородсодержащих пленок (КАВ-ТП) для интегральных микросхем и микроэлектромеханических систем. Рассмотрены процессы получения при плазменной активации кремнийсодержащих реагентов, газообразного аммиака и азота в проточных реакторах для плазмохимического осаждения (ПХО) из газовой фазы. Преимуществом таких процессов являются высокие скорости наращивания пленок при низкой (<400 °C) температуре осаждения, универсальность применения для подложек различных типов и различных материалов. К недостаткам относятся нежелательное для технологии интегральных микросхем присутствие водорода с общей концентрацией до 40 ат. %, связанного с кремнием и азотом, в результате чего пленки обладают низкой плотностью и высокими скоростями растворения в жидкостных травителях, а также плохая конформность осаждения на сложных рельефах приборов. Выделены и проанализированы направления развития метода ПХО применительно к КАВ-ТП.

Ключевые слова: нитрид кремния, тонкие пленки, плазменная активация химических реакций, проточные реакторы, кремний-азот-водородсодержащие пленки, интегральные микросхемы, микросистемная техника

Введение

В работе [1] проанализировано состояние технологий получения при термической активации тонких пленок нитрида кремния (ТПНК) для применения в технологиях интегральных микросхем

(ИМС) иnano- и микроэлектромеханических систем (МЭМС). Промышленные процессы химического осаждения из газовой фазы (ХОГФ, английский термин *Chemical Vapor Deposition*, CVD) при температурах 650...850 °C реализованы в реакторах

низкого давления (РНД) проточного типа с термической активацией химических реакций аммонолиза (реакции с аммиаком, NH_3) исходных кремнийсодержащих реагентов (SiH_4 , SiCl_4 и SiH_2Cl_2). Такие процессы позволяют получать ТПНК, близкие по составу к стехиометричным Si_3N_4 (С-ТПНК, обычно характеризуются соотношением $\text{Si}/\text{N} = 0,75$) со скоростями роста 3...10 нм/мин и отличной конформностью осаждения из SiCl_4 и SiH_2Cl_2 на ступенчатом рельефе приборов как следствие гетерогенного механизма роста тонких пленок (ТП) [2].

Во второй части обзора [3] были рассмотрены состояние и направления развития технологий получения ТПНК при термической активации исходных реагентов в реакторах циклического действия с последовательно-импульсным напуском исходных реагентов. Экспериментально установлена возможность осаждения ТПНК при существенно меньшей температуре осаждения $T_d = 300\ldots650^\circ\text{C}$ с участием кремнийсодержащих реагентов SiCl_4 и SiH_2Cl_2 , а также олигомеров Si_2Cl_6 , Si_3Cl_8 . В случаях реализации режимов атомно-слоевого осаждения (АСО) реакция идет с постоянной, но низкой скоростью наращивания, как правило, менее одного монослоя по толщине за цикл осаждения (~0,2 нм/цикл). При температурах выше 500 °C в режиме АСО пленки близки по составу к С-ТПНК, при менее 500 °C пленки ТПНК оказались нестехиометричными за счет обогащения кремнием ($\text{Si}/\text{N} > 0,75$) и при этом содержали много кислорода, а также примеси водорода и хлора.

Таким образом, по состоянию на конец 2017 г. в литературе нет сведений о возможности получения ТПНК с приемлемой для промышленного использования скоростью наращивания и характеристиками при температурах ниже 400 °C с использованием только термической активации процессов роста. Вместе с тем запрос на применение низкотемпературных ТПНК сформировался достаточно давно, а исторически первыми такими вос требованными пленками были финишные (пассивационные) покрытия для ИМС.

Постановка задач обзора

Решением проблемы получения низкотемпературных ТПНК стало использование так называемого плазмохимического осаждения (ПХО), при котором при ХОГФ дополнительно используется плазменная активация исходных реагентов, как правило, SiH_4 , NH_3 , N_2 [4–6]. Процессы ПХО исторически впервые были реализованы в простых по конструкции проточных реакторах с холодными стенками "диодного типа" (см. пример индивидуального реактора на рис. 1, a), также называемых реакторами с емкостно-связанной плазмой, ЕСП

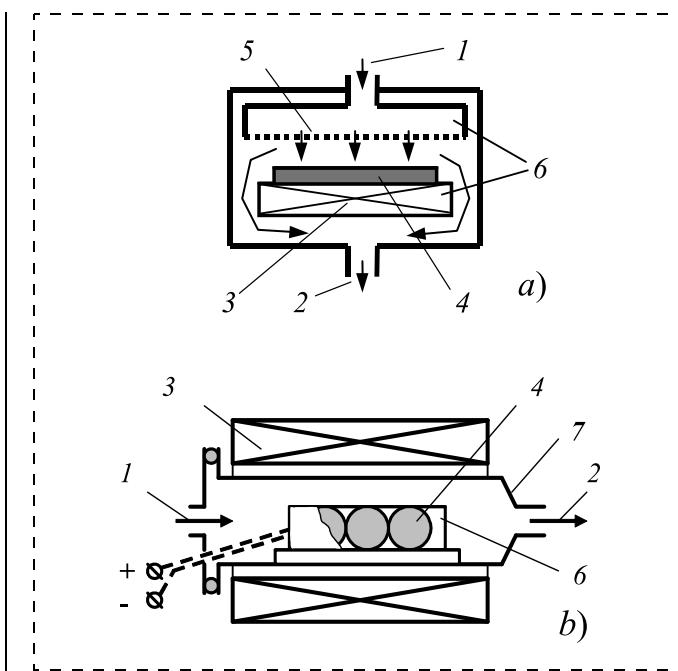


Рис. 1. Схемы основных типов промышленных проточных реакторов для получения КАВ-ТП при ПХО: a — "диодный с холодными стенками"; b — "трубчатый с горячими стенками"; 1 — ввод реагентов; 2 — вывод побочных продуктов реакции; 3 — нагреватель; 4 — полупроводниковая подложка; 5 — душевое распределительное устройство; 6 — радиочастотный электрод; 7 — кварцевая труба

Fig. 1. Circuit of the industrial parallel-plate capacitance-coupled plasma flow-type reactors for obtaining of SiNH -TF at PECVD: a — cold-wall diode reactor; b — hot-wall tubular reactor with electrodes; 1 — input of reactants; 2 — output of the reaction by-products; 3 — heater; 4 — semiconductor substrate; 5 — gas mixture assembly or showerhead; 6 — radio frequency electrode; 7 — quartz tube

(распространенный английский термин — *capacitance-coupled plasma*, CCP; кроме того, часто используют термин *parallel plate reactors*). Позднее для привычных для полупроводникового производства трубчатых РНД для ХОГФ были разработаны многоэлектродные системы диодного типа (см. рис. 1, b).

В зарубежной литературе ПХО называют Plasma Assisted CVD или, чаще всего — Plasma-Enhanced CVD, PECVD. При ПХО при давлениях P_d , равных от нескольких десятков до нескольких сотен паскалей, достигаются скорости наращивания до нескольких сотен нм/мин, однако имеет место очень слабая температурная зависимость скорости осаждения. При этом значения плотности высокочастотной (ВЧ) мощности на единицу поверхности полупроводниковой подложки ($\text{Вт}/\text{см}^2$) оказывают сильное влияние на скорость наращивания и свойства ТП. Плазменные методы получения ТП не являются строго химическими процессами и для них в литературе нет экспериментально подтвержденных брутто-реакций. При низкотемпературном ПХО формируются нестехиометричные "кремний-азот-водородсодержащие тонкие плен-

ки" (далее КАВ-ТП). Их состав зависит от температуры, природы реагентов, состава парогазовой смеси, плотности ВЧ мощности, удаленности плазменного источника от подложки, частоты высокочастотного разряда и т. д. [4, 7]. Такие пленки обозначают в литературе как $\text{Si}_x\text{N}_y\text{H}_z$, $\alpha\text{-SiN}_x:\text{H}$, $\alpha\text{-SiN}:\text{H}$ [8, 9]. Основным нежелательным компонентом КАВ-ТП является водород (его обычно представляют совокупностью связей Si—H, N—H), достигающий суммарной концентрации [H] до 40 ат. %, ухудшая такие технологически важные свойства КАВ-ТП, как плотность и скорость растворения в жидкостных травителях. Процессы ПХО обычно используются, например, в допускающем только низкие температуры технологическом субмаршруте изготовления ИМС, известном как *back-end-of-line* (BEOL) — формирование многоуровневой системы металлизации ИМС, а также для финишной пассивации ИМС, и в качестве стоп-слоев для травления.

Помимо нестехиометричности состава, принципиальным недостатком всех процессов ПХО тонких пленок является плохая (20...60 %) конформность пленок на сложном рельфе приборов [4, 10, 11]. Под конформностью в простейшем и наиболее принятом случае подразумевается процентное отношение толщины покрытия на боковой поверхности ступеньки рельефа (d_2) к таковой на плоской верхней поверхности (d_1) [2]. Конформность исследуют путем анализа сколов полупроводниковых структур с пленками на изображениях с растрового электронного микроскопа. Плохая конформность ТП усложняет применяемость КАВ-ТП в перспективных технологиях и приборах с рельефными структурами, однако она же является мотиватором для поиска новых решений, поскольку интерес именно к низкотемпературным технологиям получения конформных КАВ-ТП нарастает по мере появления новых технологических задач.

Целью настоящего обзора публикаций трех последних десятилетий является анализ направлений развития технологий получения низкотемпературных ПХО КАВ-ТП в проточных реакторах (а также информации о составе, структуре и физико-химических свойствах этих пленок). Литература по данному вопросу обширна и в большинстве своем относится к исследованиям применимости КАВ-ТП в различных технологиях; в том числе имеются некоторые обзорные публикации применительно к ИМС и МЭМС [12—15], а также работы по прямому сравнению процессов и покрытий С-ТПНК и КАВ-ТП [15, 16]. В данном обзоре мы рассматриваем только экспериментальные результаты применительно к "классическим" реакторам ПХО с ЕСП; использование при ПХО так называемой

плазмы высокой плотности, ПВП, будет проанализировано в следующей части обзора.

Краткая характеристика предыдущих обзорных публикаций по ПХО КАВ-ТП

Первые обзорные публикации по КАВ-ТП были изданы в середине — конце 1980-х годов [4, 10, 11]. В основном исследования проведены в реакторах с холодными стенками с ЕСП, например в реакторе индивидуального типа (рис. 1, a). Для осаждения КАВ-ТП при давлениях 30...300 Па использовали плазму с частотой 50...450 Гц и 13,56 МГц; в пересчете на единицу поверхности подложки плотность мощности составляла 0,02...0,2 Вт/см².

Основными задачами исследований и совершенствования КАВ-ТП как материала применительно к технологиям ИМС были: а) изучение возможности снижения температуры ПХО и свойств покрытий с сохранением высоких скоростей наращивания; б) поиск путей снижения и фиксации уровня суммарной концентрации водорода [H] в КАВ-ТП; в) повышение плотности КАВ-ТП и снижение скорости травления (т. е., для практического применения — улучшение селективности травления по отношению к пленкам диоксида кремния). В работе [11] систематизированы данные о процессах ПХО и свойствах ТПНК, полученных с использованием неорганических реагентов SiH_4 , SiF_4 , SiCl_4 , SiI_4 (основным из которых является моносилан), в присутствии аммиака и азота. Обобщены данные литературы по скоростям осаждения (W), составу пленок в терминах Si/N , суммарной концентрации водорода в ПХО КАВ-ТП ([H]), концентрациям связей [Si—H] и [N—H], зависимости показателя преломления (n), плотности (ρ), скорости растворения в жидкостных травителях (V), механических напряжений (σ) при изменениях характеристик процессов (температура, давление, доли азотсодержащих компонентов в газовой смеси, плотности ВЧ мощности, частоты ВЧ генераторов, и т. д.). Итоги детальных обобщений [11] сведены в табл. 1, где формы стрелок графически отображают ход направлений откликов характеристик КАВ-ТП при возрастании указанных в таблице параметров исследованных процессов ПХО. Кроме того, в работе [11] были обобщены данные серии отечественных работ по оценке возможности получения КАВ-ТП при ПХО из менее опасных, чем моносилан, исходных кремнийорганических соединений, например, гексаметилдисилазана $[(\text{CH}_3)_3\text{Si}]_2\text{NH}$, гексаметилциклотрисилазана $\text{C}_6\text{H}_{21}\text{Si}_3\text{N}_3$ и диэтиламино trimetilsilana $(\text{CH}_3)_3\text{SiN}(\text{C}_2\text{H}_5)_2$.

Среди проанализированных в работе [11] выделим две дополняющие друга публикации.

В работе [17] при фиксированных температуре осаждения 300 °C, давлении 25 Па и плотности ВЧ мощности 0,15 Вт/см² в диапазоне соотношений потоков NH₃/SiH₄ 1,33...4,44 были изучены изменения скорости растворения в растворе буферированной фтористоводородной кислоты HF (используются термины *Buffered Oxide Etchant*, BOE), показателя преломления *n*, соотношения Si/N и сопротивления КАВ-ТП. Установлено, что отношение Si/N изменялось в пределах 0,95...1,25, суммарная концентрация [H] = 20...25 ат. %, причем наиболее важной по влиянию на характеристики КАВ-ТП авторами была признана концентрация связей Si—H. В работе [18] проведено сравнение концентрации водорода и скорости растворения для 19 различных вариантов промышленных процессов ПХО КАВ-ТП, реализованных на разных установках диодного типа нескольких мировых производителей, а также выполнено экспериментальное исследование системы SiH₄—NH₃—N₂. Выводы авторов: 1) для смесей SiH₄—NH₃ максимальный уровень водорода в КАВ-ТП составлял [H] = 39 ат. % при 150 °C и 20 ат. % при 380 °C, но был примерно на 10 ат. % меньше при тех же температурах для смесей SiH₄—N₂; 2) водород присутствует в КАВ-ТП преимущественно в связанном виде как совокупность связей Si—H и N—H, а его общая концентрация в КАВ-ТП экспоненциально коррелирует со значением скорости их растворения (*V*_{раств}) в BOE (*V*_{раств} ≈ 0,99^{0,23[H]}).

Краткий обзор промышленных технологий получения КАВ-ТП при ПХО

В табл. 2 приведены усредненные данные из работы [4] с дополнениями из публикаций [10, 12, 15, 16, 18] по близким к промышленным процессам С-ТПНК и КАВ-ТП. Данные по основным характеристикам пленок приведены по состоянию на конец 1990-х годов применительно к технологиям ИМС. В обзорной работе [15] с указанием первоисточников информации приведена развернутая таблица важных характеристик ТПНК для применения в МЭМС. В других работах, например в [19], можно найти сравнительные данные по важному параметру пленок — твердости: для С-ТПНК — ~35 ГПа, и для КАВ-ТП, в широком диапазоне условий получения — от ~12 до ~22 ГПа; при этом по данным, например работы [20], быстрый термический отжиг КАВ-ТП при 800 °C позволял примерно вдвое повысить их твердость.

В число рутинно контролируемых в производстве параметров КАВ-ТП входят показатель преломления и значение механических напряжений. Для быстрого анализа концентрации водорода в КАВ-ТП в промышленности их осаждают на подложки монолитного кремния (включая полупроводниковые подложки большого диаметра) и анализируют неразрушающим методом инфракрасной (ИК) спектроскопии с Фурье-преобразованием (*Fourier transform infra red*, FTIR). В ИК спектрах

Таблица 1
Table 1

Графическое отображение направлений откликов характеристик КАВ-ТП при увеличении параметров процессов ПХО с участием моносилана, и аммиака и азота

Graphic responses of SiNH-TF characteristics on the PECVD process parameters increase for SiH₄—NH₃—N₂ reactants

Параметр ПХО <i>PECVD parameters</i>	Отклик характеристики КАВ-ТП (по обобщениям [11]) <i>Thin film parameters response (based on [11])</i>									
	<i>W</i>	Si/N	[H]	[N-H]	[Si-H]	<i>n</i>	<i>c</i>	<i>V</i>	σ	
Температура <i>T_d</i>	↗	↘	↘	↘	→	↗	↗	↘	↘	
Давление <i>P_d</i>	↗	↗	→	↘	↗	↗	↗	—	↘	
Доля азотсодержащих компонентов в смеси <i>Nitrogen compounds share in gas mixture</i>	↗	↘	↗	↗	↘	↘	↗	—	—	
Плотность ВЧ-мощности <i>RF power density</i>	↗	↘	→	↗	↘	↗	↗	—	—	
Частота ВЧ-генератора <i>RF frequency</i>	↗	→	↗	—	—	↗	↗	↗	↗	

Таблица 2
Table 2

Обобщенные данные о процессах получения С-ТПНК в РНД и ПХО КАВ-ТП и их основные характеристики
Summarized data on the processes of LPCVD S-SNTF and PECVD SiNH-TF with basic parameters of thin films

Обозначение тонкой пленки <i>Thin film definition</i>	С-ТПНК <i>S-SNTF</i>	КАВ-ТП <i>SiNH-TF</i>
Способ получения пленки <i>Deposition method</i>	РНД <i>LPCVD</i>	ЕСП-ПХО <i>PECVD</i>
Реагенты <i>Reactants</i>	SiH_2Cl_2 , NH_3	SiH_4 , NH_3 , N_2
Температура осаждения, °C T_d , °C	700...800	250...350
Давление, Па P_d , Pa	40...65	33...270
Скорости осаждения, нм/мин <i>Deposition rate, W, nm/min</i>	2...6	30...150
Стехиометричность (Si/N) <i>Stoichiometry (Si/N)</i>	0,75	0,8...1,2
Суммарная концентрация [H], ат. % <i>Total hydrogen content [H], at. %</i>	4...8	< 40
Показатель преломления <i>Refraction index, n</i>	2,0±0,02	1,8...2,5
Плотность, г/см ³ <i>Film density, ρ, g/cm³</i>	2,9....3,1	2,4...2,8
Механические напряжения, ×10 ⁹ дин/см ² (*) <i>Mechanical stress, σ, ×10⁹ dyne/cm² (*)</i>	12...18(P) 12...18(T)	1(C)...8(P) 1(C)...8(T)
Диэлектрическая постоянная <i>Dielectric constant</i>	6...7	6...9
Проницаемость воды <i>H_2O permeability</i>	Нулевая <i>Zero</i>	Низкая/нет <i>Low/Non</i>
Глубина проникновения ионов Na^+ , нм <i>Na^+ penetration depth, nm</i>	<10	<10
Пробивное напряжение, ×10 ⁶ В/см <i>Breakdown strength, ×10⁶ V/cm</i>	5...10	4...6
Удельное сопротивление, Ом · см <i>Specific resistance, Ω · cm</i>	10 ¹⁵ ...10 ¹⁷	10 ⁶ ...10 ¹⁵
Поверхностное сопротивление, Ом/квадрат <i>Surface resistivity, Ω/square</i>	>10 ¹³	10 ¹³
Коэффициент теплового расширения, ×10 ⁻⁶ K ⁻¹ <i>Thermal expansion coefficient, ×10⁻⁶ K⁻¹</i>	4	4...7
Термическая стабильность <i>Thermal stability</i>	Отличная <i>Excellent</i>	<400 °C
Скорость растворения, нм/мин: <i>Etch rate, V, nm/min:</i> 6:1 BOE (20 °C — 25 °C) 49 % HF (23 °C)	1,0...1,5 8,0	20...35 150...300
Скорость растворения в 85 % H_3PO_4 , нм/мин: <i>Etch rate, V in 85 % H_3PO_4, nm/min:</i> при 155 °C (at 155 °C) при 180 °C (at 180 °C)	1,5 12	10...20 60...100
Скорость растворения в 30 % KOH при 70 °C, нм/мин <i>Etch rate, V in 30 % KOH at 70 °C, nm/min</i>	0	0,68
Скорость травления в плазме, нм/мин, состава 70 % CF_4 / 30 % O_2 , 150 Вт, 100 °C <i>Rate of etching in plasma, nm/min, in 70 % of CF_4/30 % O_2, gas mixture at 150 W, 100 °C</i>	20	50
Конформность осаждения, % <i>Thin film conformality, %</i>	~100	~20...60

* — механические напряжения (P) — растяжения, (C) — сжатия. Для перевода в паскали используется соотношение: $1 \cdot 10^7$ дин/см² = 1 МПа

* — mechanical stress definition: (T) — tensile, (C) — compressive. In order to convert dyne/cm² into Pa the following correlation is used: $1 \cdot 10^7$ dyne/cm² = 1 MPa

КАВ-ТП кроме пика Si—N ~ 850 см⁻¹, имеются пики Si—H при ~ 2160 см⁻¹, и N—H при ~ 3350 см⁻¹ [7, 12, 21].

Направления совершенствования технологий ПХО КАВ-ТП

Анализ литературы позволил структурировать следующие направления развития процессов ПХО в проточных реакторах.

1. **Направление 1** характеризует оптимизацию процессов ПХО в обычных промышленных реакторах применительно к конкретному назначению КАВ-ТП в технологии ИМС. Например, в работе [22] для применения КАВ-ТП в качестве подслоя под пленкой межуровневого диэлектрика борофосфоросиликатного стекла (БФСС) рассмотрены варианты варьирования параметров процесса ПХО для оптимизации значений механических напряжений и исключения растрескиваний после высокотемпературного оплавления БФСС. К данному направлению можно также отнести, например, информацию работы [23] о технологии получения ПХО КАВ-ТП с использованием моносилана на установке Producer® Celera™ PECVD, позволяющей варьировать значения механических напряжений в осаждаемой пленке от -3,5 ГПа (сжимающие) до +1,7 ГПа (растягивающие) с приемлемой конформностью осаждения. К сожалению, подробной информации о составе КАВ-ТП не приведено, но можно предположить, что значения механических напряжений изменяются путем обогащения пленки по кремнию, что было рассмотрено в работе [1] для случая высокотемпературных пленок.

В работе [24] рассмотрен вариант реализации ПХО КАВ-ТП из смеси SiH_4 — NH_3 — N_2 , при повышенной на ~200 °C температуре относительно традиционных ПХО. Такими пленками в субмаршруте FEOL интегральных микросхем заменили С-ТПНК, получаемые при температурах выше 700 °C в промышленных проточных РНД. Повышенная до 580 °C температура ПХО относитель-

но процесса сравнения ПХО при 380 °C для мощности ВЧ разряда 170 Вт с частотой 13,56 МГц позволила снизить концентрацию связей [Si—H] от $\sim 4,5 \cdot 10^{21}$ до $\sim 4,0 \cdot 10^{21}$ ат/см³, так и связей [N—H] от $6,5 \cdot 10^{21}$ до $3,0 \cdot 10^{21}$ ат/см³ (измерения проводили методом FTIR). Скорость растворения в жидкостном травителе оказалась сниженной вдвое, а значения сжимающих механических напряжений зафиксированы на уровне $1,55 \cdot 10^9$ дин/см² (или -155 МПа). В работе [25] аналогичные КАВ-ТП были охарактеризованы с помощью разрушающего количественного метода вторично-ионной масс-спектрометрии. Для КАВ-ТП, полученных при 550 и 380 °C, общая концентрация водорода составляла $1,6 \cdot 10^{22}$ ат/см³ ($\sim 16,9$ ат. %) и $4,0 \cdot 10^{22}$ ат/см³ (~ 35 ат. %), соответственно, что согласуется с данными работы [24].

2. Направление 2 включает публикации, посвященные более глубоким исследованиям процессов ПХО и свойств КАВ-ТП. Например, в работе [26] сравнивали КАВ-ТП, полученные из смесей SiH₄—N₂ с аргоном и водородом, в [27] рассмотрена возможность получения КАВ-ТП при 200...350 °C с пониженным содержанием водорода из смесей SiH₄—NF₃—N₂, в работах [28—32] исследовали физико-химические и механические свойства КАВ-ТП, с использованием современной аналитической техники, а в [25, 28, 33, 34] изучали электрические характеристики КАВ-ТП. В работе [35] с помощью метода FTIR исследовали выделение водорода из КАВ-ТП, полученных в удаленной плазме в избытке аммиака при температуре 200 °C при термическом отжиге, которое начиналось с 500 °C и охарактеризовано как результат взаимодействия групп Si—H и N—H с образованием связей Si—N и H₂. В работе [36] в качестве исходного кремнийсодержащего вещества для ПХО исследован дисилан Si₂H₆, в [37] изучены пленки, полученные магнетронным распылением кремния в аргон-азот-водородной атмосфере, в [38] рассмотрены результаты ПХО в реакторе ЕСП с тремя электродами.

3. Направление 3 включает в себя публикации об исследованиях конформности ПХО КАВ-ТП. Требования к конформности покрытия рельефа тонкими пленками возрастают по мере развития технологий микроэлектроники и сложности полупроводниковых структур. На уровне технологий ИМС примерно 0,35...0,18 мкм и менее неконформность осаждения приводит к проблемам образования пустот (в англоязычной литературе используется термин *voiding*) и, соответственно, поиску технологических возможностей заполнения зазоров в рельефе ИМС без пустот (в зарубежной литературе используется термин *gap-fil*) [39, 40]. Ввиду того, что конформность осаждения покрытий часто декларируется применительно к рельефу произвольной фор-

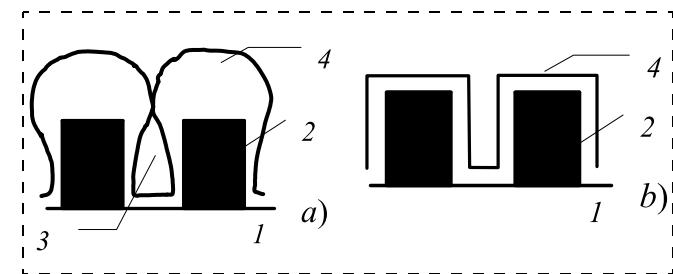


Рис. 2. Схемы поперечного сечения профиля тонких пленок на структурах ИМС, полученных с помощью осаждения ПХО (a) и ХОГФ (b): 1 — подложка; 2 — ступеньки из нижележащего материала; 3 — пустота в зазоре; 4 — конформная тонкая пленка

Fig. 2. Circuits of the cross-sections of the strictly non-conformal PECVD film deposition (a) and LPCVD film deposition (b): 1 — substrate; 2 — steps from the material below; 3 — emptiness in the gap; 4 — conformal thin film

мы, трактовать представленные в исследованиях результаты количественно достаточно сложно, в особенности для процессов ПХО. Однако типичными для ПХО являются сечения структур с избыточным количеством осаждаемого материала на верхних частях ступенек рельефа (рис. 2, a), что часто называют термином *bread loaf*. Конформность получения покрытий для процессов ПХО существенно уступает практически идеальной конформности С-ТПНК, полученных при использовании термически активированных процессов осаждения (рис. 2, b).

В работах автора [2, 40] сформулированы относительно простые методические подходы и даны количественные характеристики различных процессов осаждения кремнийсодержащих покрытий применительно к рельефу ИМС с прямоугольными в сечении ступеньками. Одним из выводов приведенных публикаций была установленная количественная взаимосвязь конформности осаждения и эффективной константы скорости процессов ХОГФ тонких кремнийсодержащих пленок (k_{eff} , размерность см/с). Последняя представляет собой отношение скорости наращивания (W) к концентрации кремнийсодержащего реагента в газовой фазе [C_{Si}]: $k_{eff} \approx W/[C_{Si}]$. Экспериментально найденные значения k_{eff} варьировались в пределах трех порядков величин [2]. Оказалось возможным связать конформность соотношения для исследованных процессов со значениями k_{eff} следующим образом: d_2/d_1 (%) $\approx 45,4 k_{eff}^{-0,51}$. Практическим следствием из данного выражения является вывод о невозможности получения конформных покрытий в активированных процессах получения пленок, имеющих большие значения k_{eff} . Для процессов ПХО диэлектрических пленок конформность оценена в 20...60 %. Напротив, медленные процессы осаждения с малыми значениями k_{eff} , например, высокотемпературный процесс С-ТПНК в

РНД (табл. 2), дает практически 100 % конформности осаждения [24].

Автор хотел бы подчеркнуть, что если в литературе приведены большие, чем указанные выше значения конформности для плазменных процессов, то это объясняется, как правило, применением структур с наклонными боковыми стенками. Публикаций с количественными результатами исследований конформности роста КАВ-ТП при плазменной активации немного. Например, в работе [24] для процессов ПХО КАВ-ТП при температурах 380, 430, 480, 530 и 580 °C конформность оценена примерно в 52, 54, 57, 64 и 69 %, соответственно (отметим, однако, что сами по себе исходные структуры не охарактеризованы).

Заключение

Проанализированы процессы ПХО с участием кремнийсодержащих реагентов, газообразного аммиака и азота в проточных реакторах при температурах ниже ~400 °C. Их преимуществами являются относительная простота реализации, существенно меньшие температурные зависимости и высокие скорости наращивания пленок. Основной проблемой низкотемпературного ПХО из смесей SiH₄—NH₃ является нестехиометричность КАВ-ТП, в частности, нежелательное для технологии присутствие водорода с суммарной концентрацией до 40 ат. %, связанного с кремнием и азотом, в результате чего пленки имеют низкую плотность и высокие скорости растворения. В следующей части обзора будут рассмотрены результаты исследований осаждения КАВ-ТП в реакторах с плазмой высокой плотности, позволяющих преодолеть часть технологических проблем ПХО.

Список литературы

1. **Васильев В. Ю.** Технологии получения тонких пленок нитрида кремния для микроэлектроники и микросистемной техники. Часть 1. Термически активированные процессы в проточных реакторах // Нано- и микросистемная техника. 2018. Т. 20, № 5. С. 287–296.
2. **Vasilyev V. Yu.** Thin Film Chemical Vapor Deposition in Integrated Circuit Technology: Equipment, Methodology and Thin Film Growth Experience. New York: Nova Science Publishers, Inc., 2014. 314 p.
3. **Васильев В. Ю.** Технологии получения тонких пленок нитрида кремния для микроэлектроники и микросистемной техники. Часть 2. Термически активированные процессы в реакторах циклического действия // Нано- и микросистемная техника. 2018. Т. 20, № 6. С. 329–339.
4. **Adams A. C.** Dielectric and Polysilicon Film Deposition // VLSI Technology, 2nd ed. Ed. by S. M. Sze. McGraw-Hill Int. Edition, 1988. P. 233–271.
5. **Cheng H. C.** Dielectric and Polysilicon Film Deposition // In ULSI Technology. Ed. by C. Y. Chang and S. M. Sze. McGraw-Hill Int. Edition, 1996. P. 205–269.
6. **Ting C. H.** Inorganic Dielectrics // In Handbook of Multilevel Metallization for Integrated Circuits / Eds. S. R. Wilson, C. J. Tracy, J. L. Freeman. Park Bridge, NJ.: Noyes Publications, 1993. P. 202–273.
7. **Silicon nitride in Electronics** // Ed. by A. V. Rzhanov. Elsevier Science Publishers B. V., 1988. 263 p.
8. **Knolle W. R., Osenbach J. W.** The structure of plasma-deposited silicon nitride films determined by infrared spectroscopy // J. Appl. Phys. 1985. Vol. 58, N. 3. P. 1248–1254.
9. **Kaloyerous A. E., Jove F. A., Goff J., et al.** Review-Silicon Nitride and Silicon Nitride-Rich Thin Film Technologies: Trends in Deposition Techniques and Related Applications // ECS J. of Solid State Sci. Techn. 2017. Vol. 6, N 10. P. P691–P714.
10. **Шепелев С. Н., Васильев В. Ю., Попов В. П.** Плазмохимическое осаждение тонких слоев в реакторах пониженного давления // Обзоры по электронной технике. Часть 1. Сер. 2. Вып. 7. М.: ЦНИИ "Электроника", 1986. 53 с.
11. **Шепелев С. Н., Васильев В. Ю., Попов В. П.** Плазмохимическое осаждение тонких слоев в реакторах пониженного давления // Обзоры по электронной технике. Часть 2. Сер. 2. Вып. 7. М.: ЦНИИ "Электроника", 1988. 62 с.
12. **Xia L.-Q., Chang M.** Chemical Vapor Deposition // Handbook of Semiconductor Manufacturing Technology, second edition / Ed. By R. Doering and Y. Nishi. CRC press, 2008. P. 13-1–13-87.
13. **Cote D. R., Nguyen S. V., Stamper A. K., et al.** Plasma-assisted chemical vapor deposition of dielectric thin films for ULSI semiconductor circuits // IBM J. of Res. Develop. 1999. Vol. 43, N 1/2. P. 5–38.
14. **Hamedani Y., Macha P., Bunning T. J., et al.** Plasma-Enhanced Chemical Vapor Deposition: Where we are and the Outlook for the Future // In Chemical Vapor Deposition — Recent Advances and Applications in Optical, Solar Cells and Solid State Devices / Ed. by Neralla S., InTex., 2016. P. 247–280.
15. **Stoffel A., Kovacs A., Kronast W., et al.** LPCVD against PECVD for micromechanical applications // J. Micromech. Microeng. 1996. Vol. 6. P. 1–13.
16. **Joshi B. C., Eranna G., Runthala D. P., et al.** LPCVD and PECVD silicon nitride for microelectronics technology // Indian J. Eng. & Mater. Sci. 2000. Vol. 7, N 4. P. 303–309.
17. **Stein H. J., Wells V. A., Hampy R. E.** Properties of Plasma-Deposited Silicon Nitride // J. Electrochem. Soc. 1979. Vol. 126, N 10. P. 1750–1754.
18. **Chow R., Lanford W. A., Wang K.-M., et al.** Hydrogen content of a variety of plasma-deposited silicon nitrides // J. Appl. Phys. 1982. Vol. 53, N 8. P. 5630–5633.
19. **Huang H., Winchester K. J., Suvorova A., et al.** Effect of deposition conditions on mechanical properties of low-temperature PECVD silicon nitride films // Mat. Sci. and Eng. A. 2006. Vol. 435–436. P. 453–459.
20. **Yan H.-Y., Ou K.-S., Chen K.-S.** Mechanical Properties Measurement of PECVD Silicon Nitride after Rapid Thermal Annealing Using Nanoindentation Technique // Strain. 2008. Vol. 44. P. 259–266.
21. **Jonak-Auer I., Meisels R., Kechar F.** Determination of the hydrogen concentration of silicon nitride layers by Fourier transform infrared spectroscopy // Infrared Phys. and Technol. 1997. Vol. 38. P. 223–226.
22. **Kim N.-H., Seo Y.-J. Park S.-W., et al.** Optimization of silicon nitride films for linear pore-metal dielectric process // Microelectron. Eng. 2005. Vol. 81. P. 29–34.
23. **Applied Materials, Inc.** Producer® Celera™ PECVD / URL: <http://www.appliedmaterials.com/products/producer-celera-pecvd> (дата обращения 18.04.2018).

24. **Cotler T. J., Chapple-Sokol J.** High Quality Plasma-Enhanced Chemical Vapor Deposited Silicon Nitride Films // *J. Electrochem. Soc.* 1993. Vol. 140, N 7. P. 2071–2075.
25. **Wang C. Y., Lim E. H., Vassiliev V. Y., et al.** Hydrogen concentration analysis in sequentially deposited thin films and application of surface charge analysis technique for fast and non-destructive characterization of PECVD silicon nitride / Proc. 17th Intern. VLSI Multilevel Interconnection Conf. (VMIC). Santa Clara. California (USA). June 2000. P. 411–413.
26. **Allaert K., Casler A. V., Loos H., et al.** A comparison Between Silicon Nitride Films Made by PCVD N₂–SiH₄/Ar and N₂–SiH₄–He // *J. Electrochem. Soc.* 1985. Vol. 132, N 7. P. 1763–1766.
27. **Flamm D. L., Chang C.-P., Ibotton D. E., et al.** A New Chemistry for Low Hydrogen PECVD Silicon Nitride // *Solid State Technol.* 1987. Vol. 30, N 3. P. 43, 44.
28. **Osenbach J. W., Zell J., Knolle W. R., et al.** Electrical, physical, and chemical characteristics of plasmaassisted chemi-cavapor deposited semiinsulating SiN:H and their use as a resistive field shield for high voltage integrated circuits // *J. Appl. Phys.* 1990. Vol. 67, N 11. P. 6830–6843.
29. **Zhang X., Grigoropoulos C. P.** Thermal conductivity and diffusivity of freestanding silicon nitride thin films // *Rev. Sci. Instrum.* 1995. Vol. 86, N 2. P. 1115–1120.
30. **Hansch W., Nakajima A., Yokoyama S.** Characterization of silicon/oxide/nitride layers by x-ray photoelectron spectroscopy // *Appl. Phys. Lett.* 1999. Vol. 75, N 11. P. 1535–1537.
31. **Vila M., Caceres D., Prieto C.** Mechanical properties of sputtered silicon nitride films // *J. Appl. Phys.* 2003. Vol. 94, N 12. P. 7868–7873.
32. **Обижаков Д. Ю.** Структура и свойства функциональных слоев нитрида кремния на различных стадиях их формирования в технологии нано- и микросистемной техники. Автореф. дисс. на соиск. уч. степени к. т. н. М., 2007. 22 с.
33. **Sharma V.** Study of Charges Present in Silicon Nitride Thin Films and Their Effect on Silicon Solar Cell Efficiencies. Ph. D. dissertation. Arizona State University. USA, 2013. 163 p.
34. **Komarov F. F., Vlasukova L. A., Parkhomenko I. N., et al.** Strong Room-Temperature Photoluminescence of Si-rich and N-rich Silicon-Nitride Films // Proc. Int. Conf. Nanomaterials: Application and Properties. 2013. Vol. 2, N 1. P. 01TEA12 (4 p.).
35. **Boehme C., Lucovsky G.** Dissociation reactions of hydrogen in remote plasma-enhanced chemical-vapor-deposition silicon nitride // *J. Vac. Sci. Technol. A.*, 2001. Vol. 19, N 5. P. 2622–2628.
36. **Nallapati G.** Plasma Enhanced Chemical Vapor Deposition of Silicon Nitride and Oxynitride Films Using Disilane as Silicon Source // LSU Historical Dissertations and Theses. Louisiana State University. 1999. № 6899. 109 p.
37. **Batan A., Franquet A., Vereecken J., et al.** Characterization of the silicon nitride thin films deposited by plasma magnetron // *Surf. Interface Anal.* 2007. Vol. 40. P. 754–757.
38. **Grigaitis T., Naujokaitis A., Tumeas S., et al.** Characterization of silicon nitride layers deposited in three-electrode plasma-enhanced CVD chamber // *Lithuan. J. Phys.* 2015. Vol. 55, N 1. P. 35–43.
39. **Васильев В. Ю.** Тренды развития методов химического осаждения из газовой фазы тонкопленочных материалов для прецизионных технологий // Нано- и микросистемная техника. 2014. № 9 (170). С. 37–44.
40. **Vassiliev V. Y., Sudijono J. L., Cuthbertson A.** Trends in Void-Free Pre-Metal CVD Dielectrics // *Solid State Technol.* 2001. Vol. 44, N 3. P. 129–136.

V. Yu. Vasilyev, D. Sc., Professor, vasilev@corp.nstu.ru,
Novosibirsk State Technical University, Novosibirsk, 630073, Russian Federation, Deputy Director General,
SibIS LLC., Novosibirsk, 630082, Russian Federation

Corresponding author:

Vasilyev Vladimir Yu., D. Sc., Professor, Novosibirsk State Technical University, Novosibirsk, 630073, Russian Federation, Deputy Director General, SibIS LLC, Novosibirsk, 630082, Russian Federation, vasilev@corp.nstu.ru

Silicon Nitride Thin Film Technologies for Microelectronics and Microsystem Technologies.

Part 3. Plasma Activated Processes in the Flow Reactors

Received on May 22, 2018

Accepted on June 15, 2018

The third part of the review is devoted to the status and possible directions for development of the silicon-nitrogen-hydrogen-containing thin films' (SiNH-TF) plasma-enhanced chemical vapor deposition (PECVD) technologies for application in the integrated circuits (IC) and microelectromechanical systems (MEMS). Information is analyzed for the low-temperature (< 400 °C) SiNH-TF, obtained in parallel-plate capacitance-coupled plasma flow-type PECVD reactors with the use of the silicon-containing compounds (mostly SiH₄), gaseous ammonia and nitrogen. These processes have certain advantages, such as high thin film deposition rate, and wide-range applicability in many modern technologies. The main drawback of the low-temperature SiNH-TF obtained with the use of SiH₄–NH₃–N₂ is a rather high content of hydrogen, up to 40 at. %, therefore, it is nonstoichiometric. This hydrogen is normally described in terms of Si–H and N–H bonds. The low-temperature SiNH-TF have relatively low film density and high speed of dissolution in liquid etchants, and also a poor conformality of deposition on complex reliefs of devices. The author singles out and analyzes the directions for development of PECVD method with regard to SiNH-TF.

Keywords: silicon nitride, thin films, chemical reactions with plasma activation, capacitance-coupled plasma, flow reactors, integrated circuits, microelectromechanical systems

For citation:

Vasilyev V. Yu. Silicon Nitride Thin Film Technologies for Microelectronics and Microsystem Technologies. Part 3. Plasma Activated Processes in the Flow Reactors, *Nano- i Mikrosistemnaya Tekhnika*, 2018, vol. 20, no. 9, pp. 542–554.
DOI: 10.17587/nmst.20.542-554

Introduction

In [1] an analysis is presented of the state of the thermal activation technologies for obtaining of the thin films of silicon nitride (SNTF) for application in the technologies of the integrated circuits (IC) and nano- and microelectromechanical systems (MEMS). The industrial processes of chemical deposition from the gas phase (Chemical Vapor Deposition, CVD) at 650...850 °C are realized in the low pressure CVD reactors (LPCVD) of the flow type with the thermal activation of the chemical reactions of ammonolysis (reactions with ammonia, NH₃) of the initial silicon-containing reagents (SiH₄, SiCl₄ and SiH₂Cl₂). Such processes allow us to obtain SNTF close by their composition to the stoichiometric Si₃N₄ (S-SNTF, usually characterized by correlation Si/N = 0.75) with the deposition (growth) rates of 3...10 nm/min and excellent conformality of deposition from SiCl₄ and SiH₂Cl₂ on the step relief of the devices as a consequence of the heterogeneous growth mechanism of TF [2].

The second part of the review [3] is devoted to the state and directions of development of the technologies for obtaining of SNTF at a thermal activation of the initial reagents in the cyclic-action reactors with a consecutive pulse injection of the initial reagents. Possibility of deposition of SNTF at an essentially smaller temperature of deposition $T_d = 300\ldots650$ °C with participation of SiCl₄ and SiH₂Cl₂, and also oligomers of Si₂Cl₆, Si₃Cl₈ was proved experimentally. In cases of realization of the mode of the atomic-layer deposition (ALD), a reaction goes with a constant, but low deposition rate, as a rule, less than one monolayer of the thickness for a deposition cycle (~0.2 nm/cycle). At temperatures over 500 °C in ALD mode the films by their composition are close to S-SNTF, at temperatures below 500 °C the SNTF films turn out to be nonstoichiometric because of enrichment by silicon (Si/N > 0.75) and contain a lot of oxygen and also impurities of hydrogen and chlorine.

Thus, as of the end of 2017, there was no information about feasibility of obtaining of SNTF with the deposition rate acceptable for the industrial purposes at temperatures below 400 °C with the use of only a thermal activation of the growth processes. At the same time the demand for application of the low-temperature SNTF was generated long time ago, and historically the first such demand was for the films of the finishing (passivation) coatings for ICs.

The tasks set by the review

A solution to the problem of the low-temperature SNTF became the use of the Plasma-Enhanced Chemical Vapor Deposition (PECVD), at which CVD requires additional plasma activation of the initial reagents, SiH₄, NH₃, N₂, as a rule [4–6]. Historically, for the first time, the PECVD processes were realized in simple-design flow reactors with cold walls "of diode type" (an example of an individual reactor is in fig. 1, a) also called the reactors with the capacitance-coupled plasma, CCP, besides, a frequently used term is parallel plate reactors). Later, for semi-conductor manufacture of the usual tubular LPCVD, the multielectrode systems of a diode type (fig. 1, b) were developed. In foreign literature PECVD are called also named "Plasma Assisted CVD".

In case of PECVD at pressures P_d from several tens up to several hundreds of pascals, the deposition rates up to several hundreds of nm/min are reached, however, the temperature dependence of the deposition rate is very weak. At that, the values of the density of radio-frequency (RF) power per unit of the surface of a semiconductor substrate (W/cm²) have a strong impact on the deposition rate and properties of TF. The plasma methods for obtaining of TF are not strictly chemical processes and for them there are no experimentally proved gross reactions. In case of a low-temperature PECVD the nonstoichiometric silicon-nitrogen-hydrogen-containing thin films (SiNH-TF) are formed. Their composition depends on the temperature, the nature of the reagents, composition of the steam and gas mixes, density of RF power, remoteness of a plasma source from a substrate, frequency of the RF discharge, etc. [4, 7]. Such films are designated also as Si_xN_yH_z, α-SiN_x:H, α-SiN:H [8, 9]. The main undesirable component of SiNH-TF is hydrogen (usually, it is presented as a set of Si—H, N—H bonds), reaching the total concentration [H] up to 40 at. %, thus it deteriorates such technologically important properties of SiNH-TF as density and rate of dissolution (etch rate) in the liquid etchants. The PECVD processes are usually used, for example, in the admitting only low temperatures technological sub-route for manufacturing of IC, known as the "Back-End-Of-Line" (BEOL) — formation of a multilevel system for metallization of ICs, and also for the finishing passivation of ICs, and as the stop layers for etching.

Besides the nonstoichiometric composition, a principle drawback of all the PECVD processes of the thin

films is bad (20...60 %) conformality of the films on a complex relief of the devices [4, 10, 11]. The conformality in its simplest and wide-spread understanding is a per cent correlation of the thickness of the coating on the lateral surface of a relief step (d_2) to the one on the flat top surface (d_1) [2]. The conformality is investigated by a cross-section analysis of the chips of the semiconductor structures with the films on the images from a scanning electron microscope. Bad conformality of TF complicates applicability of SiNH-TF in the perspective technologies and devices with the relief structures, however, it is a motivator for search for new solutions, because the interest exactly to the low-temperature technologies for obtaining of the conformal SiNH-TF grows with appearance of new technological problems.

The aim of the present review of the publications of three recent decades is an analysis of the directions for development of the technologies for obtaining of low-temperature PECVD of SiNH-TF in the flow reactors (and also information concerning the composition, structure and physical and chemical properties of these films). The literature on the given question is extensive and in most cases it concerns the research of applicability of SiNH-TF in various technologies; including certain survey publications with reference to ICs and MEMS [12—15], and also the works of direct comparison of the processes and coatings of S-SNTF and SiNH-TF [15, 16]. In the given survey we consider only the experimental results in relation to the "classical" reactors of PECVD with CCP; the use of the so called "high-density plasma" (HDP) at PECVD will be analyzed in the next part of the review.

A brief characteristic of the previous survey of publications concerning PECVD SiNH-TH

The first review materials on SiNH-TH were published in mid-late 1980s [4, 10, 11]. The research was mainly done in the reactors with cold walls and CCP, for example, in the reactor of an individual type (fig. 1, a). For deposition of SiNH-TH at pressures of 30...300 Pa the plasma with frequency of 50...450 Hz and 13.56 MHz was used; in terms of a unit of the substrate surface the density of power was 0.02...0.2 W/cm².

The primary goals of research and perfection of SiNH-TF as a material with reference to the IC technologies were: a) studying of a possibility of decreasing of PECVD temperature and properties of coatings with preservation of the high deposition rates; b) search for ways to decrease and fix the level of the total concentration of hydrogen [H] in SiNH-TF; c) increase of the density of SiNH-TF and decrease of the rate of etching (that is, for a practical application — improvement of the selectivity of etching in relation to the silicon diox-

ide films). The work [11] systematizes the data about the PECVD processes and properties of SNTF received with the use of inorganic reagents of SiH₄, SiF₄, SiCl₄, SiI₄ (the main of which is monosilane) in the presence of ammonia and nitrogen. It generalizes the literature data on the deposition rates (W), composition of the films in terms of Si/N ratio, total concentration of hydrogen in PECVD SiNH-TF ([H]), concentrations of [Si—H] and [N—H] bonds, dependencies of the refraction index (n), density (ρ), etch rate in liquid etchants (V), mechanical stresses (σ) during variation of the characteristics of the processes (temperature, pressure, fractions of the nitrogen-containing components in a gas mix, density of RF power, frequency of RF generators, etc.).

The results of the detailed generalizations [11] are presented in table 1, where the forms of the arrows graphically display the directions of the responses of characteristics of SiNH-TF in case of increase of the parameters of the investigated PECVD processes specified in the table. Besides, the work [11] presents a generalization of the data of the series of the domestic works concerning feasibility of obtaining of SiNH-TF at PECVD from less dangerous, than monosilane, initial organic silicon compounds, for example, hexamethyldisilazane [(CH₃)₃Si]₂NH, hexamethylcyclotrisilazane C₆H₂₁Si₃N₃ and diethylaminotrimetilsilane (CH₃)₃SiN(C₂H₅)₂.

Out of the publications analyzed in [11] we will single out two publications supplementing each other. In [17] at a fixed temperature of deposition of 300 °C, pressure of 25 Pa and density of RF power of 0.15 W/cm² in the range of correlations of flows of NH₃/SiH₄ of 1.33...4.44 the variations of the etch rate in a solution of *Buffered Oxide Etchant*, BOE, the refraction index n , the correlations of Si/N ratio and SiNH-TF resistance were studied. It was established, that Si/N ratio varied within the limits of 0.95...1.25, total concentration [H] = 20...25 at. %, at that, the author recognized that the most important influence on SiNH-TF characteristics was rendered by the concentration of Si—H bonds. In [18] a comparison was done of the concentration of hydrogen and the rate of dissolution for 19 various versions of the industrial processes of PECVD SiNH-TF realized on various installations of the parallel-plate capacitance-coupled plasma type from various world manufacturers, and also an experimental research was done of the SiH₄—NH₃—N₂ system. The author made the following conclusions: 1) for mixes of SiH₄—NH₃ the maximal level of hydrogen in SiNH-TF was [H] = 39 at. % at 150 °C and 20 at. % at 380 °C, but it was approximately by 10 at. % less than at the same temperatures for mixtures of SiH₄—N₂; 2) hydrogen was present in SiNH-TF mainly in the bound kind as a set of Si—H and N—H bonds), and its general con-

centration in SiNH-TF exponentially correlated with the values of the etch rate BOE (the author of the review evaluates this correlation as follows: $V \sim 0.99^{0.23[H]}$).

A brief review of the industrial technologies for obtaining of SiNH-TF at PECVD

Table 2 presents the average data from [4] with additions from [10, 12, 15, 16, 18] on close to the industrial processes of S-SNTF and SiNH-TF. The data concerning the basic characteristics of the films are presented as of the end of 1990s with reference to the IC technologies. The survey work [15] presents a detailed table of important SNTF characteristics for application in MEMS with indication of the primary sources of the information. In the other works, for example in [19], it is possible to find the comparative data on the important parameter of the films — hardness: for S-SNTF — ~35 GPa, and for SiNH-TF, in a wide range of conditions of obtaining — from ~12 up to ~22 GPa; at that, according to the data [20], a fast thermal annealing of SiNH-TF at 800 °C allowed to approximately double their hardness.

Among the number of the SiNH-TF routine-controlled parameters in manufacture are the index of refraction and the value of the mechanical stresses. For a fast analysis of the concentration of hydrogen in SiNH-TF in industry they are deposited on the substrates of monolithic silicon (including the semiconductor substrates of a large diameter) and analyzed by Fourier transform infra red, FTIR, nondestructive method). In FTIR spectra of SiNH-TF, besides the peak of Si—N of ~850 cm⁻¹, there are peaks of Si—H at ~2160 cm⁻¹, and of N—H at ~3350 cm⁻¹ [7, 12, 21].

Directions for perfection of PECVD SiNH-TF technologies

The analysis allowed us to structure the following directions for development of the PECVD processes in the flow reactors.

1. **Direction 1** characterizes optimization of the PECVD processes in regular industrial reactors with reference to a concrete purpose of SiNH-TF in IC technology. For example, in [22] for application of SiNH-TF as an intermediate layer under the film of the interlayer dielectric of borophosphosilicate glass (BPSG) the versions of the parameters of the PECVD process were considered for optimization of the values of the mechanical stresses and elimination of cracking after a high-temperature vitrification of BPSG. To the same direction we can also refer the information [23] about the technology for obtaining of PECVD SiNH-TF with the use of monosilane on Producer® Celera™ installation, allowing to vary the values of the mechanical

stresses in the deposited film from −3.5 GPa (compressing) up to +1.7 GPa (tensile) with an acceptable conformality of deposition. Unfortunately, a detailed information concerning composition of SiNH-TF is not available, but it is possible to assume, that the values of the mechanical stresses vary by means of the film enrichment with silicon, which was considered in [1] for the case of high-temperature films.

In [24] a version is considered for realization of PECVD SiNH-TF from SiH₄—NH₃—N₂ mixture at the temperature raised by ~200 °C in comparison with the traditional PECVD. In Front-End-of-Line (FEOL) sub-route of the integrated circuits such films replaced S-SNTF, received at temperatures above 700 °C in the industrial flow LPCVD. Raised up to 580 °C temperature of PECVD in relation to the process of comparison of PECVD at 380 °C for the power of RF discharge of 170 W with frequency of 13.56 MHz allowed to lower the concentration of bonds [Si—H] from ~4.5 · 10²¹ down to ~4.0 · 10²¹ at/cm³, and for the bonds [N—H] from 6.5 · 10²¹ down to 3.0 · 10²¹ at/cm³ (the measurements were made by FTIR method). The rate of dissolution in a liquid etchant appeared to be twice as low, while the values of the compressing mechanical stresses were recorded at the level of 1.55 · 10⁹ dynes/cm² (or −155 MPa). In [25] similar SiNH-TF were characterized by means of the destroying quantitative method of the secondary ion mass spectrometry. For SiNH-TF obtained at 550 and 380 °C the total concentration of hydrogen was 1.6 · 10²² at/cm³ (~16.9 at. %) and 4.0 · 10²² at/cm³ (~35 at. %), accordingly, which corresponded to the data of the work [24].

2. **Direction 2** includes the publications dedicated to a deeper research of the PECVD processes and SiNH-TF properties. For example, in [26] SiNH-TF were compared, received from SiH₄—N₂ mixtures with argon and hydrogen, in [27] an opportunity was considered to obtain SiNH-TF at 200...350 °C with a lower content of hydrogen from SiH₄—NF₃—N₂ mixtures, in the works of [28–32] the physical-chemical and mechanical properties of SiNH-TF were studied with the use of modern analytical technologies, in [25, 28, 33, 34] the electric characteristics of SiNH-TF were studied. In [35] by means of FTIR method the author investigated the hydrogen loss from SiNH-TF, received in a remote plasma in excess of ammonia at 200 °C at a thermal annealing, which began from 500 °C and was characterized as a result of interaction of Si—H and N—H groups with formation of Si—N bonds and H₂. The author of [36] as the initial siliceous substance silicon-containing reagent for PECVD investigated disilane Si₂H₆, in [37] the films received by magnetron sputtering of silicon in the argon-nitrogen-hydrogen atmosphere were investigated, the authors of [38] considered

the results of PECVD in CCP reactor with three electrodes.

3. **Direction 3** includes the publications about the research of the conformality of PECVD SiNH-TF. The requirements to the conformality of coating of the relief by thin films increase in the process of development of the microelectronic technologies and complexity of the semiconductor structures. At the level of IC technologies of approximately 0.35...0.18 μm and less, the non-conformality of deposition leads to problems of formation of voidings and, accordingly, to a search for technological possibilities for a *gap-fill* in the IC relief without voidings [39, 40]. Since the conformality of deposition of coatings is often declared with reference to a relief of an arbitrary form, it is difficult enough to interpret quantitatively the results presented in the research, especially for the PECVD processes. However, for PECVD typical are the sections of the structures with superfluous quantity of the deposited material on the top parts of the relief steps (fig. 2, *a*), which are often called "bread loaf". The conformality of obtaining of coatings for the PECVD processes essentially concedes to practically an ideal conformality of S-SNTF, received due to the use of the thermally activated processes of deposition (fig. 2, *b*).

In his works the author [2, 40] formulated rather simple methodical approaches and gave quantitative characteristics to various processes of deposition of the silicon-based coatings with reference to the IC relief with the steps rectangular in section. One of the conclusions of the presented publications is the established quantitative interrelation of the conformality of deposition and an effective constant of the reposition rate of the CVD processes of thin silicon-based films (k_{eff} , dimension of cm/s). The latter is the relation of the deposition rate (W) to the concentration of a silicon-containing reagent in the gas phase [C_{Si}]: $k_{\text{eff}} \sim W/[C_{\text{Si}}]$. The experimentally found values of k_{eff} varied within three orders of the magnitude [2]. It appeared possible to connect the conformality of the correlation for the investigated processes with the values of k_{eff} in the following way: $d_2/d_1 (\%) \approx 45.4 h_{\text{eff}}^{-0.51}$. A practical consequence from the given expression is the conclusion about impossibility of obtaining of the conformal coatings in the activated processes for obtaining of the films having great values of k_{eff} . For the PECVD processes of the dielectric films the conformality is estimated as 20...60 %. On the contrary, the slow processes of deposition with small values of k_{eff} , for example, high-temperature process of S-SNTF in LPCVD (the first column of table 2), gives practically 100 % of conformality of deposition [24].

The author would like to underline, that, if in the literature the values of conformality for the plasma processes are higher than the ones specified above, this, as

a rule, is explained by application of the structures with the inclined lateral walls. There are few publications with the quantitative results of the research of the conformality of growth of SiNH-TF during a plasma activation. For example, in [24] the conformality for the processes of PECVD SiNH-TF at 380, 430, 480, 530 and 580 °C was estimated approximately as 52, 54, 57, 64 and 69 %, accordingly, however, the initial structures themselves are not characterized.

Conclusion

The PECVD processes with participation of the silicon-containing reagents, gaseous ammonia and nitrogen in the flow reactors at temperatures below ~400 °C have been analyzed. Their advantages are a relative simplicity of realization, essentially smaller temperature dependences and high deposition rates of films. The major problem of a low-temperature PECVD from SiH_4-NH_3 mixtures is the nonstoichiometry of SiNH-TF, in particular, an undesirable for the technology presence of hydrogen with the total concentration up to 40 at. %, bound with the silicon and nitrogen, due to which the films have a low density and high rate of dissolution. In the following part of the review we will present the results of the research of deposition of SiNH-TF in the reactors with high density plasma, allowing us to overcome certain technological problems of PECVD.

References

1. Vasilyev V. Yu. *Tehnologii poluchenija tonkih plenok nitrida kremnija dlja mikroelektroniki i mikrosistemnoj tekhniki. Chast 1. Termicheski aktivirovannyje processy v protocnyh reaktorah*, *Nano- i Mikrosistemnaya Tekhnika*, 2018, vol. 20, no. 5, pp. 287–296 (in Russian).
2. Vasilyev V. Yu. *Thin Film Chemical Vapor Deposition in Integrated Circuit Technology: Equipment, Methodology and Thin Film Growth Experience*. New York, Nova Science Publishers, Inc.: 2014. 314 p.
3. Vasilyev V. Yu. *Tehnologii poluchenija tonkih plenok nitrida kremnija dlja mikroelektroniki i mikrosistemnoj tekhniki. Chast 2. Termicheski aktivirovannyje processy v reaktorah ciklicheskogo dejstvija reaktorah*, *Nano- i Mikrosistemnaya Tekhnika*, 2018, vol. 20, no. 6, pp. 329–339 (in Russian).
4. Adams A. C. *Dielectric and Polysilicon Film Deposition, VLSI Technology / 2nd edition*. Ed. by S. M. Sze. McGraw-Hill Int. Edition, 1988, pp. 233–271.
5. Cheng H. C. *Dielectric and Polysilicon Film Deposition, ULSI Technolog. / Ed. by C. Y. Chang and S. M. Sze. Mc.Graw-Hill Int. Edition*, 1996, pp. 205–269.
6. Ting C. H. *Inorganic Dielectrics, In Handbook of Multilevel Metallization for Integrated Circuits/Eds. S. R. Wilson, C. J. Tracy, J. L. Freeman. Park Bridge, NJ, Noyes Publications*, 1993, pp. 202–273.
7. Silicon nitride in Electronics / Ed. by A. V. Rzhanov, Elsevier Science Publishers B. V. 1988, 263 p.

8. **Knolle W. R., Osenbach J. W.** The structure of plasma-deposited silicon nitride films determined by infrared spectroscopy, *J. Appl. Phys.*, 1985, vol. 58, no. 3, pp. 1248–1254.
9. **Kaloyerous A. E., Jove F. A., Goff J.** et al. Review-Silicon Nitride and Silicon Nitride-Rich Thin Film Technologies: Trends in Deposition Techniques and Related Applications, *ECS J. of Solid State Sci. Techn.*, 2017, vol. 6, no. 10, pp. 691–714.
10. **Shepelev S. N., Vasilyev V. Yu., Popov V. P.** *Plazmohimicheskoe osazhdzenie tonkih sloev v reaktorah ponizhennogo davlenija, Obzory po elektronnoj tehnike*. P. 1. Ser. 2. Is. 7. Moscow, CNII "Jelektronika", 1986, 53 p. (in Russian).
11. **Shepelev S. N., Vasilyev V. Yu., Popov V. P.** *Plazmohimicheskoe osazhdzenie tonkih sloev v reaktorah ponizhennogo davlenija, Obzory po elektronnoj tehnike*. P. 2. Ser. 2. Vyp. 7. Moscow, CNII "Jelektronika", 1988, 62 p. (in Russian).
12. **Xia L.-Q., Chang M.** Chemical Vapor Deposition, In *Handbook of Semiconductor Manufacturing Technology*, second edition / Ed. By R. Doering and Y. Nishi, CRC press, 2008, pp. 13-1–13-87.
13. **Cote D. R., Nguyen S. V., Stamper A. K.**, et al. Plasma-assisted chemical vapor deposition of dielectric thin films for ULSI semiconductor circuits, *IBM J. of Res. Develop.* 1999, vol. 43, no. 1/2, pp. 5–38.
14. **Hamedani Y., Macha P., Bunning T. J.**, et al. Plasma-Enhanced Chemical Vapor Deposition: Where we are and the Outlook for the Future, In *Chemical Vapor Deposition – Recent Advances and Applications in Optical, Solar Cells and Solid State Devices* / Ed. by Neralla S., InTex, 2016, pp. 247–280.
15. **Stoffel A., Kovacs A., Kronast W.** et al. LPCVD against PECVD for micromechanical applications, *J. Micromech. Microeng.* 1996, vol. 6, pp. 1–13.
16. **Joshi B. C., Eranna G., Runthala D. P.** et al. LPCVD and PECVD silicon nitride for microelectronics technology, *Indian J. Eng. & Mater. Sci.*, 2000, vol. 7, no. 4, pp. 303–309.
17. **Stein H. J., Wells V. A., Hampy R. E.** Properties of Plasma-Deposited Silicon Nitride, *J. Electrochem. Soc.*, 1979, vol. 126, no. 10, pp. 1750–1754.
18. **Chow R., Lanford W. A., Wang K.-M.** et al. Hydrogen content of a variety of plasma-deposited silicon nitrides, *J. Appl. Phys.* 1982, vol. 53, no. 8, pp. 5630–5633.
19. **Huang H., Winchester K. J., Suvorova A.** et al. Effect of deposition conditions on mechanical properties of low-temperature PECVD silicon nitride films, *Mat. Sci. and Eng. A*, 2006, vol. 435–436, pp. 453–459.
20. **Yan H.-Y., Ou K.-S., Chen K.-S.** Mechanical Properties Measurement of PECVD Silicon Nitride after Rapid Thermal Annealing Using Nanoindentation Technique, *Strain*, 2008, vol. 44, pp. 259–266.
21. **Jonak-Auer I., Meisels R., Kechar F.** Determination of the hydrogen concentration of silicon nitride layers by Fourier transform infrared spectroscopy, *Infrared Phys. and Technol.*, 1997, vol. 38, pp. 223–226.
22. **Kim N.-H., Seo Y.-J., Park S.-W.** et al. Optimization of silicon nitride films for linear pore-metal dielectric process, *Microelectron. Eng.*, 2005, vol. 81, pp. 29–34.
23. **Applied Materials, Inc.** Producer® Celera™ PECVD, available at: <http://www.appliedmaterials.com/products/producer-celera-pecvd> (date of access 18.04.2018).
24. **Cotler T. J., Chapple-Sokol J.** High Quality Plasma-Enhanced Chemical Vapor Deposited Silicon Nitride Films, *J. Electrochem. Soc.*, 1993, vol. 140, no. 7, pp. 2071–2075.
25. **Wang C. Y., Lim E. H., Vassiliev V. Y.** et al. Hydrogen concentration analysis in sequentially deposited thin films and application of surface charge analysis technique for fast and non-destructive characterization of PECVD silicon nitride, *Proc. 17th Intern. VLSI Multilevel Interconnection Conf. (VMIC)*, Santa Clara. California (USA), June 2000, pp. 411–413.
26. **Allaert K., Casler A. V., Loos H.** et al. A comparison Between Silicon Nitride Films Made by PCVD N₂–SiH₄/Ar and N₂–SiH₄–He, *J. Electrochem. Soc.*, 1985. vol. 132, no. 7, pp. 1763–1766.
27. **Flamm D. L., Chang C.-P., Ibbottson D. E.** et al. A New Chemistry for Low Hydrogen PECVD Silicon Nitride, *Solid State Technol.*, 1987, vol. 30, no. 3, pp. 43–44.
28. **Osenbach J. W., Zell J., Knolle W. R.** et al. Electrical, physical, and chemical characteristics of plasmaassisted chemi-cavapor deposited semiinsulating SiN:H and their use as a resistive field shield for high voltage integrated circuits, *J. Appl. Phys.*, 1990, vol. 67, no. 11, pp. 6830–6843.
29. **Zhang X., Grigoropoulos C. P.** Thermal conductivity and diffusivity of freestanding silicon nitride thin films, *Rev. Sci. Instrum.*, 1995, vol. 86, no. 2, pp. 1115–1120.
30. **Hansch W., Nakajima A., Yokoyama S.** Characterization of silicon/oxide/nitride layers by x-ray photoelectron spectroscopy, *Appl. Phys. Lett.*, 1999, vol. 75, no. 11, pp. 1535–1537.
31. **Vila M., Caceres D., Prieto C.** Mechanical properties of sputtered silicon nitride films, *J. Appl. Phys.*, 2003, vol. 94, no. 12, pp. 7868–7873.
32. **Obizhaev D. Ju.** *Struktura i svojstva funkcional'nyh sloev nitrida kremnija na razlichnyh stadijah ih formirovaniya v tehnologii ustrojstv nano- i mikrosistemnoj tehniki*. Avtoref. diss. na soisk. uch. stepeni k.t.n. Moscow, 2007, 22 p. (in Russian).
33. **Sharma V.** *Study of Charges Present in Silicon Nitride Thin Films and Their Effect on Silicon Solar Cell Efficiencies*, Ph. D. dissertation, Arizona State University. USA, 2013, 163 p.
34. **Komarovsky F. F., Vlasukova L. A., Parkhomenko I. N.** et al. Strong Room-Temperature Photoluminescence of Si-rich and N-rich Silicon-Nitride Films, *Proc. Int. Conf. Nanomaterials: Application and Properties*, 2013, vol. 2, no. 1. pp. 01TEA12 (4 p.).
35. **Boehme C., Lucovsky G.** Dissociation reactions of hydrogen in remote plasma-enhanced chemical-vapor-deposition silicon nitride, *J. Vac. Sci. Technol. A.*, 2001, vol. 19, no. 5, pp. 2622–2628.
36. **Nallapati G.** *Plasma Enhanced Chemical Vapor Deposition of Silicon Nitride and Oxynitride Films Using Disilane as Silicon Source*, LSU Historical Dissertations and Theses. Louisiana State University, 1999, no. 6899. 109 p.
37. **Batan A., Franquet A., Vereecken J.** et al. Characterization of the silicon nitride thin films deposited by plasma magneton, *Surf. Interface Anal.*, 2007, vol. 40, pp. 754–757.
38. **Grigaitis T., Naujokaitis A., Tumėnas S.** et al. Characterization of silicon nitride layers deposited in three-electrode plasma-enhanced CVD chamber, *Lithuan. J. Phys.*, 2015, vol. 55, no. 1, pp. 35–43.
39. **Vasilyev V. Yu.** Trendy razvitiya metodov himicheskogo osazhdnenija iz gazovoj fazy tonkoplenochnyh materialov dlja precizionnyh tehnologij, *Nano- i Mikrosistemnaya tekhnika*, 2014, no. 9, pp. 37–44 (in Russian).
40. **Vassiliev V. Y., Sudijono J. L., Cuthbertson A.** Trends in Void-Free Pre-Metal CVD Dielectrics, *Solid State Technol.*, 2001, vol. 44, no. 3, pp. 129–136.

ЭЛЕМЕНТЫ МНСТ MICRO- AND NANOSYSTEM TECHNIQUE ELEMENTS

УДК 537.8, 537.9, 535.51

DOI: 10.17587/nmst.20.555-561

К. А. БРЕХОВ, мл. науч. сотр., e-mail: brekhov_ka@mail.ru,
Московский технологический университет (МИРЭА), Москва

НАПРЯЖЕННОСТЬ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПОЛЯ В ПЛАНАРНОМ КОНДЕНСАТОРЕ НА ОСНОВЕ ТОНКОЙ СЕГНЕТОЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ПЛЕНКИ BaSrTiO_3

Поступила в редакцию 12.04.2018

Проведено моделирование значений и характера распределения напряженности электрического поля, возникающего в планарном конденсаторе на основе тонкой сегнетоэлектрической пленки титаната бария-стронция $(\text{Ba}_x\text{Sr}_{1-x}\text{TiO}_3)$ (BST), при приложении к нему электрического поля. Показано, что распределение напряженности поля в межэлектродном пространстве симметрично, однако имеет ярко выраженные особенности в приэлектродной области. Исследована зависимость возникающей напряженности от диэлектрической проницаемости пленки BST , а также от расстояния между электродами. Исследован характер распределения напряженности электрического поля вглубь структуры планарного конденсатора.

Ключевые слова: сегнетоэлектрики, титанат бария-стронция, планарная геометрия, электрическое поле, моделирование

Введение

В настоящее время тонкие пленки различных сегнетоэлектрических материалов широко применяют при создании большого числа разного рода устройств микро-, нано-, опто- и СВЧ электроники, так как являются радиационно стойкими, имеют малые потери и стабильные характеристики в широком диапазоне температур [1].

Высокие диэлектрические характеристики, малые времена переключения, а также возможность управлять параметрами этих материалов с помощью внешних воздействий (например, электрическим полем) позволяют использовать их при создании электрооптических модуляторов, элементов памяти, разнообразных сенсоров и преобразователей, частотных фильтров, фазовращателей, а также перестраиваемых высокодобротных резонаторов [2–4]. Наиболее широко для создания таких функциональных элементов применяют эпитаксиальные пленки титаната бария-стронция $(\text{Ba}_{1-x}\text{Sr}_x\text{TiO}_3)$, BST [5].

В большинстве устройств на основе тонких сегнетоэлектрических пленок переключение поляризации осуществляется в направлении, перпенди-

кулярном плоскости пленки, что позволяет управлять поляризацией напряжениями порядка единиц вольт. Однако для многих оптических и СВЧ приложений более предпочтительной является планарная геометрия, поскольку она обусловливает наиболее эффективное взаимодействие электромагнитной волны и сегнетоэлектрической поляризации. Функциональные элементы с планарной топологией электродов можно применять для совмещения в единой структуре оптический и СВЧ диапазоны путем непосредственной модуляции оптического луча СВЧ сигналом, принимаемым антенной. В данном случае функциональные элементы в виде планарного конденсатора, копланарной или щелевой линии передачи могут служить в качестве составных частей резонатора либо фильтра в приемной части антенны и одновременно в частях модулятора в оптическом тракте.

При уменьшении латеральных размеров функциональных элементов важную роль начинают играть размерные эффекты, которыми при макроскопических размерах можно пренебречь. В частности, при уменьшении толщины сегнетоэлектрической пленки и размеров планарного конденсатора за-

метную роль в распределении поля начинают играть приэлектродные области. Поэтому исследование распределения полей в таких структурах приобретает большое значение.

В данной работе представлены результаты моделирования значения и характера распределения компоненты напряженности электрического поля, возникающего в планарном конденсаторе на основе тонкой сегнетоэлектрической пленки BST при приложении к нему электрического поля. Эта компонента направлена вдоль зазора между электродами (x -компоненты), в зависимости от его ширины. Также проведена оценка глубины проникновения поля в структуру планарного конденсатора.

Моделирование

Значение напряженности, а также характер ее распределения были определены с помощью программной среды Comsol Multiphysics, в которой была построена модель планарного конденсатора с золотыми электродами высотой 200 нм, нанесенными на пленку BST толщиной 1 мкм, осажденную на подложку MgO толщиной 500 мкм при приложении к нему электрического поля. Основными параметрами модели, влияющими на значение напряженности и ее распределение, являются диэлектрическая проницаемость среды, приложенное напряжение и ширина зазора между электродами. При моделировании расстояние между электродами варьировалось в пределах 1...35 мкм, что соответствует структурам, применяемым в современных оптоэлектронных и СВЧ устройствах. Схематическое изображение исследуемой структуры представлено на рис. 1.

Согласно литературным данным [6–9], в зависимости от состава и толщины значение диэлектрической проницаемости пленки BST может лежать в пределах 200...1000. Моделирование показало, что значение x -компоненты напряженности электрического поля в центре зазора между электродами слабо зависит от значения диэлектрической проницаемости. Для планарной структуры с шириной зазора 2 мкм было установлено, что при

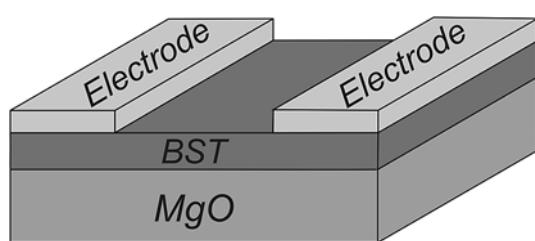


Рис. 1. Схематичное изображение моделируемой структуры

Fig. 1. Schematic image of the modeled structure

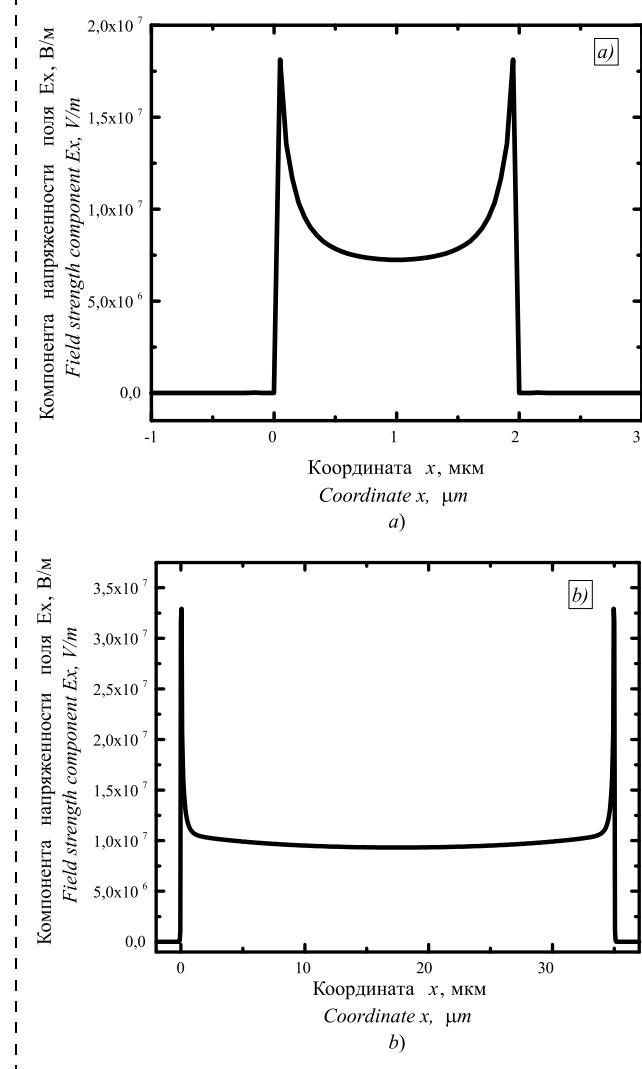


Рис. 3. Распределения x -компоненты напряженности электрического поля вдоль зазора между электродами для зазоров: *a* — 2 мкм; *b* — 35 мкм. Отношение прикладываемого напряжения к ширине зазора — 10 В/мкм

Fig. 3. Distribution of the Ex -component of the electric field intensity along the gap between the electrodes for the gaps: *a* — 2 μm ; *b* — 35 μm . The relation of the applied voltage to the width of the gap — 10 V/ μm

изменении диэлектрической проницаемости пленки BST в диапазоне 200...1000, значение x -компоненты напряженности в центре зазора изменяется в пределах 1,1 % ($6,92 \cdot 10^6$... $7 \cdot 10^6$ В/м). На основании полученных результатов в дальнейших исследованиях диэлектрическая проницаемость BST была принята равной 500 [6]. Диэлектрическая проницаемость подложки MgO была принята равной 10, согласно работам [10, 11].

На рис. 2 (см. третью сторону обложки) представлен характер распределения напряженности поля в межэлектродном пространстве при приложении напряжения к планарной системе электродов. Видно, что x -компоненты напряженности электрического поля распределены в зазоре симметрично относительно центра. При этом стоит отметить, что

наибольшего значения она достигает в приэлектродных областях, что согласуется с работой [9].

На рис. 3 *a*, и *b* приведены распределения значений *x*-компоненты напряженности электрического поля вдоль зазора между электродами в случае, когда зазор составляет 2 и 35 мкм соответственно. Отчетливо видно, что значение напряженности в приэлектродных областях значительно превышает значение напряженности в центре зазора.

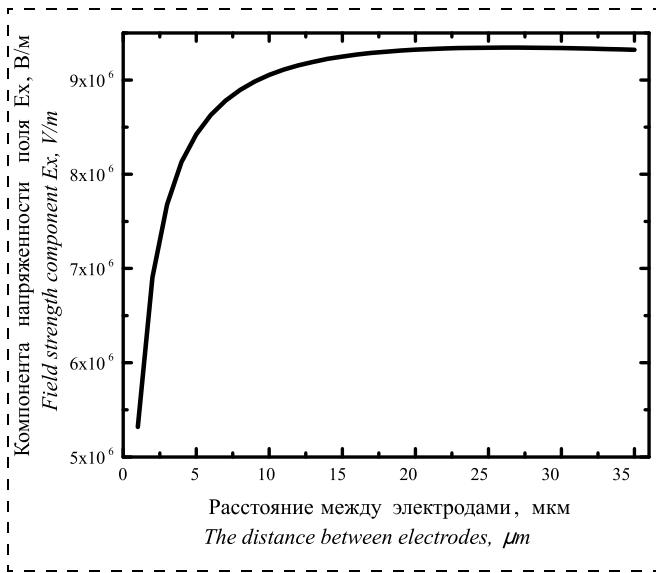


Рис. 4. Зависимость *x*-компоненты напряженности электрического поля в центре зазора между электродами от ширины зазора. Отношение прикладываемого напряжения к ширине зазора — 10 В/мкм

Fig. 4. Dependence of the *Ex*-component of the electric field intensity in the centre of the gap between the electrodes on the width of the gap. The relation of the applied voltage to the width of the gap — 10 V/ μ m

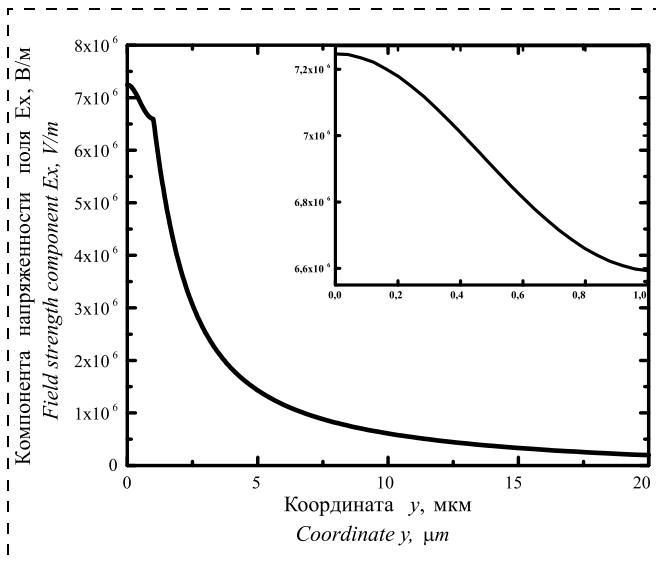


Рис. 5. Распределение *x*-компоненты напряженности поля в центре зазора вглубь структуры

Fig. 5. Distribution of the *Ex*-component of the field intensity in the centre of the gap deep into the structure

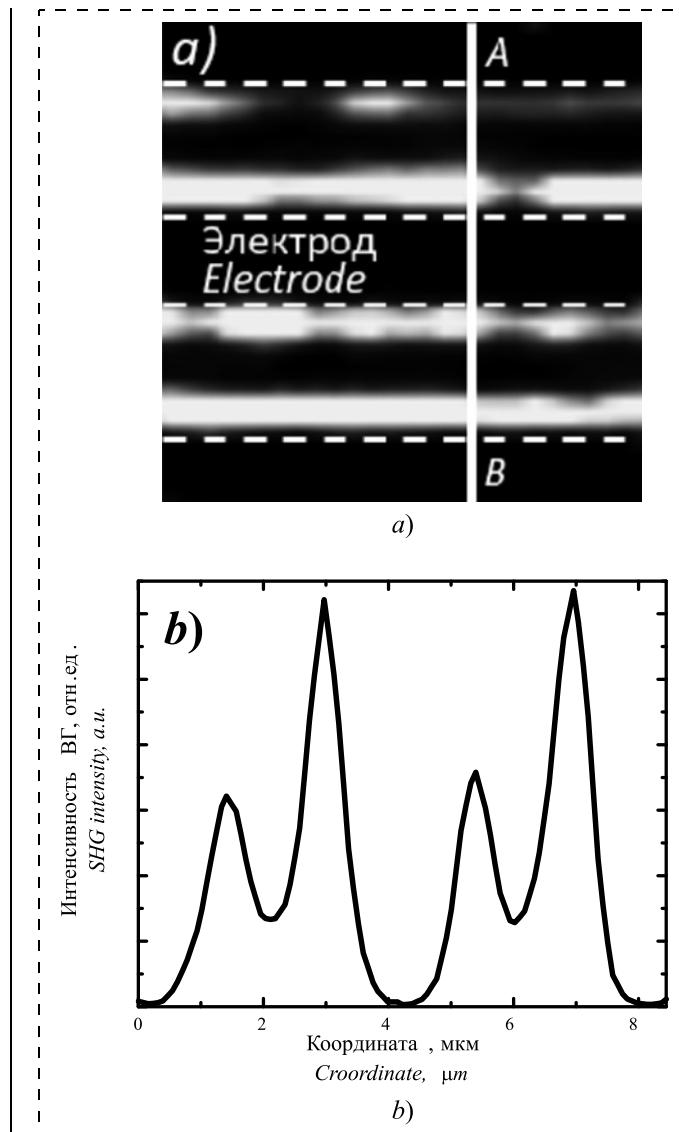


Рис. 6. Нелинейно-оптическое изображение (*a*) и распределение интенсивности ВГ вдоль линии А—В (*b*)

Fig. 6. Nonlinear-optical image (*a*) and distribution of SHG intensity along *A*—*B* line (*b*)

Также в работе осуществлялось моделирование распределения *x*-компоненты напряженности электрического поля в зависимости от ширины зазора между электродами. При таком моделировании отношение приложенного напряжения к ширине зазора оставалось постоянным и составляло 10 В/мкм, что является характерным значением в реально используемых устройствах. Результаты моделирования представлены на рис. 4.

Видно, что с увеличением ширины зазора до 20 мкм, *x*-компоненты напряженности поля в центре зазора увеличивается с $5,5 \cdot 10^6$ до $9,3 \cdot 10^6$ В/м, а при дальнейшем увеличении — остается практически постоянной.

На рис. 5 представлено распределение значения *x*-компоненты напряженности в толщине исследуемой структуры. Видно, что поле проникает в под-

ложку лишь на 10 мкм. Это значит, что основная часть напряженности распределена в сегнетоэлектрической пленке. На вставке показано, как спадает x -компоненты напряженности поля в толщине пленки BST. Видно, что ее значение изменяется с $6,6 \cdot 10^6$ до $7,25 \cdot 10^6$ В/м.

Экспериментальная проверка данных, полученных путем моделирования, была проведена методом генерации второй оптической гармоники (ГВГ) с использованием установки, описанной в работе [12], на пленке $\text{Ba}_{0,8}\text{Sr}_{0,2}\text{TiO}_3$ толщиной 1 мкм с встречно-штыревой системой планарных золотых электродов. Ширина зазора и электродов составляла 2 мкм, прикладываемое напряжение — 20 В.

На рис. 6, *a* приведено нелинейно-оптическое изображение исследуемой структуры. Широкие темные полосы по краям и в центре изображения соответствуют электродам. Штриховыми линиями выделены области, в которых находится сегнетоэлектрическая пленка. Светлые области соответствуют приэлектродным областям, в которых наблюдается значительное усиление сигнала ВГ. Это объясняется тем, что интенсивность ВГ пропорциональна поляризации среды, которая напрямую зависит от x -компоненты напряженности электрического поля. На рис. 6, *b* приведено распределение интенсивности ВГ вдоль линии А—В (рис. 6, *a*). Здесь также видно усиление сигнала ВГ в приэлектродных областях, что подтверждает результаты моделирования. Несимметричность распределения интенсивности ВГ в приэлектродных областях можно объяснить наличием в пленке BST непереключаемой части поляризации, а также искажением пленки, возникающим в результате пьезоэффекта.

Заключение

Таким образом, проведено моделирование значения и характера распределения x -компоненты напряженности электрического поля, возникающей в планарном конденсаторе на основе тонкой сегнетоэлектрической пленки титаната бария-стронция, при приложении к нему разности потенциалов. Установлено, что значение напряженности электрического поля в центре зазора крайне мало зависит от диэлектрической проницаемости сегнетоэлектрической пленки BST, оставаясь в пределах $6,92 \cdot 10^6 \dots 7 \cdot 10^6$ В/м при изменении диэлектрической проницаемости в диапазоне 200...1000. Показано, что распределение x -компоненты напряженности поля в межэлектродном пространстве симметрично относительно центра, неоднородно и имеет ярко выраженные усиления в приэлектродных областях. Исследование зависимости возникающей напряженности от расстояния между

электродами при постоянном отношении приложенного напряжения к ширине зазора показало, что с увеличением ширины зазора до 20 мкм x -компоненты напряженности поля в центре зазора увеличивается, а после 20 мкм остается практически постоянной. Также было показано, что при распространении вглубь структуры планарного конденсатора, электрическое поле в подложке быстро спадает, а основная часть напряженности сосредоточена в сегнетоэлектрической пленке, в которой ее значение изменяется с $6,6 \cdot 10^6$ до $7,25 \cdot 10^6$ В/м.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования и науки РФ (грант 14.Z50.31.0034, госзадание 3.7500.2017/9.10).

Список литературы

1. Shirokov V. B., Biryukov S. V., Mukhortov V. M., Yuzyuk Y. I. Polarization of thin barium-strontium titanate films by an external electric field // Tech. Phys. 2011. Vol. 56, N. 8. P. 1175—1180.
2. Ishikawa K., Yoshikawa K., Okada N. Size effect on the ferroelectric phase transition in PbTiO_3 ultrafine particles // Phys. Rev. B. 1988. Vol. 37, N. 10. P. 5852—5855.
3. Scott J. F. Phase transitions in ferroelectric thin films // Phase Transitions. 1991. Vol. 30, N. 1—4. P. 107—110.
4. Блинов Л. М., Фридкин В. М., Палто С. П., Буне А. В., Даубен П. А., Дюшарм С. Двумерные сегнетоэлектрики // Успехи Физ. Наук. 2000. Том. 170, № 3. С. 247—262.
5. Shut V. N., Syrtsov S. R., Trublovsky V. L. Ferroelectric properties of compositionally graded BST ceramics // Phase Transitions. 2010. Vol. 83, N. 5. P. 368—377.
6. Park W. Y., Hwang C. S. Film-thickness-dependent Curie-Weiss behavior of $(\text{Ba}, \text{Sr})\text{TiO}_3$ thin-film capacitors having Pt electrodes // Appl. Phys. Lett. 2004. Vol. 85, N. 22. P. 5313—5315.
7. Lookman A., McAneney J., Bowman R. M., Gregg J. M., Kut J., Rios S., Ruediger A., Dawber M., Scott J. F. Effects of poling, and implications for metastable phase behavior in barium strontium titanate thin film capacitors // Appl. Phys. Lett. 2004. Vol. 85, N. 21. P. 5010—5012.
8. Komandin G. A., Mukhortov V. M., Porodinkov O. E., Spektor I. E. Dielectric response of $(\text{Ba}, \text{Sr})\text{TiO}_3$ thin films in a terahertz and IR ranges // Phys. Solid State. 2013. Vol. 55, N. 2. P. 288—292.
9. Yoon Y.-K., Kenney J. S., Hunt A. T., Allen M. G. Low-loss microelectrodes fabricated using reverse-side exposure for a tunable ferroelectric capacitor application // J. Micromechanics Microengineering. 2006. Vol. 16, N. 2. P. 225—234.
10. Subramanian M. A., Shannon R. D., Chai B. H. T., Abraham M. M., Wintersgill M. C. Dielectric constants of BeO , MgO , and CaO using the two-terminal method // Phys. Chem. Miner. 1989. Vol. 16, N. 8. P. 741—746.
11. Mazierska J., Ledenyov D., Jacob M. V., Krupka J. Precise microwave characterization of MgO substrates for HTS circuits with superconducting post dielectric resonator // Supercond. Sci. Technol. 2005. Vol. 18, N. 1. P. 18—23.
12. Брехов К. А., Лавров С. Д., Афанасьев М. С. и др. Линейный электрооптический эффект в пленках BST: расчет коэффициента Керра // Нано- и микросистемная техника. 2014. № 4. С. 12—14.

Corresponding author:

Brekhov Kirill A., Junior Researcher, MIREA — Russian Technological University, Moscow, 119454, Russian Federation, brekhov_ka@mail.ru

Electric Field Intensity in a Planar Capacitor Based on Thin BaSrTiO₃ Ferroelectric Film

Received on April 12, 2018

Accepted on April 27, 2018

This work presents the results of the magnitude and distribution modeling of the electric field intensity in a planar capacitor based on a thin ferroelectric barium-strontium titanate ($Ba_xSr_{1-x}TiO_3$, BST) film, when an electric field is applied to it. It was discovered that the intensity of electric field in the center of the gap between the electrodes depends very little on the ferroelectric BST film permittivity and varies within 1.1 %, when the permittivity varies within 200–1000. It was demonstrated that the field intensity Ex-component distribution in the interelectrode space was symmetric with respect to the center, but had pronounced features in the near-electrode area. The field intensity Ex-component's dependence on the distance between the electrodes was studied at a constant ratio of the applied voltage to the gap width. It was discovered that the field intensity Ex-component in the center of the gap increased with the increase of the gap width up to 20 μm , and after that it remained practically constant. It was also demonstrated that the electric field in the substrate decreased rapidly deep to the planar capacitor structure, and the primary tension was concentrated in the ferroelectric film.

Keywords: ferroelectrics, barium strontium titanate, in-plane geometry, electric field, simulation

For citation:

Brekhov K. A. Electric Field Intensity in a Planar Capacitor Based on Thin BaSrTiO₃ Ferroelectric Film, *Nano- i Mikrosistemnaya Tekhnika*, 2018, vol. 20, no. 9, pp. 555–561.

DOI: 10.17587/nmst.20.555-561

Introduction

Thin films of various ferroelectric materials are widely applied for development of a large number of various devices of the micro-, nano-, opto- and microwave electronics, because they are radiation-resistant, have small losses and stable characteristics in a wide range of temperatures [1].

High dielectric characteristics, short switching times, and a possibility of control of the materials' parameters by means of the external influences (electric field) allow us to use them for development of the electro-optical modulators, memory elements, various sensors and converters, frequency filters, phase shifters, and also tunable high-Q resonators [2–4]. The epitaxial films of barium strontium titanate ($Ba_{1-x}Sr_xTiO_3$, BST) [5] are the films, which are most widely applied for development of such functional elements.

In most of the devices based on the thin ferroelectric films the polarization switching is carried out in the direction, perpendicular to the film plane, which allows us to control polarization by the voltage of units of volts. However, for many optical and microwave applications the planar geometry is more preferable, because it ensures the most effective interaction of an electromagnetic wave and ferroelectric polarization. The functional elements with a planar topology of the electrodes can be applied for combining in a single structure of the optical and microwave bands by a direct modulation of

the optical beam by a microwave signal received by the antenna. In this case the functional elements in the form of a planar capacitor, coplanar or a slot-hole transfer line can serve as components of a resonator or a filter in the receiving part of the antenna and, simultaneously, in the modulator parts in the optical path.

When the lateral sizes of the functional elements are reduced, the dimensional effects, which at the macroscopical sizes can be neglected, start to play an important role. In particular, in the case of ferroelectric film thickness and the planar capacitor sizes reduction, the near-electrode areas start to play an appreciable role in the field distribution. Therefore, the research of the fields distribution in such structures acquires great importance.

The given work presents the results of the value and the distribution character modeling of the electric field intensity component arising in the planar capacitor based on the thin ferroelectric BST film, when an electric field is applied to it. This component is directed along the gap between the electrodes (Ex-component), depending on its width. Besides, an estimation of the depth of the penetration of the field into the structure of the planar capacitor was done.

Modeling

The value of the intensity, and also the pattern of its distribution were determined by means of Comsol Mul-

tiphysics environment program, in which a model of the planar capacitor was constructed with the gold electrodes of 200 nm in height, deposited on a BST film with thickness of 1 μm , deposited on MgO substrate with thickness of 500 μm during application of electric field to it. The model's key parameters influencing the value of the intensity and its distribution, are the dielectric permeability of the environment, the applied voltage and the width of the gap between the electrodes. During the modeling the distance between the electrodes varied within 1...35 μm , which corresponded to the structures applied in the modern optoelectronic and microwave devices. A schematic image of the investigated structure is presented in fig. 1.

According to [6–9], depending on the structure and thickness, the value of the BST film dielectric permittivity can be within 200...1000. The modeling demonstrated that the value of the Ex-component of the electric field intensity in the centre of the gap between the electrodes depended little on the value of the dielectric permittivity. For the planar structure with the width of the gap of 2 μm it was established, that due to a change of the dielectric permeability of the BST film within the range of 200...1000, the value of the Ex-component intensity in the centre of the gap varied within the limits of 1.1 % ($6.92 \cdot 10^6$... $7 \cdot 10^6$ V/m). On the basis of the received results in the further research the dielectric permeability of BST was assumed as equal to 500 [6]. According to the works [10, 11], the dielectric permeability of MgO substrate was accepted as equal to 10.

Fig. 2 (see the 3rd side of cover) presents the electric field intensity distribution in the interelectrode space when voltage is applied to the planar system of electrodes. It is clear, that the Ex-component of the electric field intensity is distributed in the gap symmetrically in relation to the centre. It should be noted, that it reaches the greatest value in the near-electrode areas which agrees well with [9].

Fig. 3, *a* and *b* present the electric field Ex-component intensity values distribution along the gap between the electrodes, in case when the gap equals to 2 and 35 μm , accordingly. It is obvious that the value of the intensity in the near-electrode areas exceeds considerably the value of the intensity in the center of the gap.

Besides, the work presents modeling of the electric field Ex-component intensity distribution depending on the width of the gap between the electrodes. In case of such modeling the relation of the applied voltage to the width of the gap remained constant and was equal to 10 V/ μm , which was typical for the really used devices. The results of the modeling are presented in fig. 4.

It is obvious that with an increase of the width of the gap up to 20 μm the Ex-component of the field intensity in the center of the gap increases from $5.5 \cdot 10^6$ up to $9.3 \cdot 10^6$ V/m, while a further increase leaves it practically constant.

Fig. 5 presents Ex-component intensity value distribution in the thickness of the investigated structure. It is visible, that the field's penetration into the substrate is only 10 μm . This means, that the basic part of the intensity is distributed in the ferroelectric film. The insert demonstrates how the Ex-component of the field intensity goes down in the thickness of the BST film: from $6.6 \cdot 10^6$ down to $7.25 \cdot 10^6$ V/m.

The data received by modeling was experimentally checked by the method of the second harmonic generation (SHG) with the use of the setup described in the work [12], on $\text{Ba}_{0.8}\text{Sr}_{0.2}\text{TiO}_3$ film with thickness of 1 μm and with the interdigital system of the planar gold electrodes. The width of the gap and electrodes was 2 μm , and the applied voltage — 20 V.

Fig. 6, *a* presents a nonlinear-optical image of the investigated structure. The wide dark strips along the edges and in the centre of the image correspond to the electrodes. The dashed lines designate the areas, in which there is a ferroelectric film. The light areas correspond to the near-electrode areas, in which a considerable strengthening of HG signal is observed. This is explained by the fact that the SHG intensity is proportional to the polarization of the environment, which depends directly on the Ex-component of the electric field intensity. Fig. 6, *b* presents the distribution of the SHG intensity along A—B line (fig. 6, *a*). Here, the strengthening of the SHG signal in the near-electrode areas is also visible, which proves the results of the modeling. The asymmetry of the distribution of the SHG intensity in the near-electrode areas can be explained by the presence of the nonswitched part of polarization in the BST film, and also by a distortion of the film due to a piezoelectric effect.

Conclusion

Thus, modeling was done of the value and the distribution of the electric field Ex-component intensity arising in the planar capacitor based on the thin ferroelectric film of barium-strontium titanate, when a potential difference is applied to it. It was discovered that the electric field intensity value in the centre of the gap depends very little on the value of the dielectric permeability of a ferroelectric BST film, remaining within the range of $6.92 \cdot 10^6$... $7 \cdot 10^6$ V/m during variation of the dielectric permeability in the range of 200...1000. It was demonstrated, that the electric field Ex-component intensity distribution in the interelectrode space was symmetric in relation to the centre, not uniform and had very pronounced intensifications in the near-electrode areas. The research of the arising intensity dependence on the distance between the electrodes at a constant relation of the applied voltage to the width of the gap, demonstrated, that with an increase of the width of the gap up to 20 μm , the electric field Ex-com-

ponent intensity in the gap centre increased, and after 20 μm — remained practically constant. Also, it was demonstrated that during its propagation inside the structure of the planar capacitor, the electric field in the substrate goes down quickly, while the main part of the intensity is concentrated in the ferroelectric film, in which its value varies from $6.6 \cdot 10^6 \text{ V/m}$ up to $7.25 \cdot 10^6 \text{ V/m}$.

The work was done with the financial support of the Ministry of Education and Science of the Russian Federation (grant 14.Z50.31.0034, government order 3.7500.2017/9.10).

References

1. Shirokov V. B., Biryukov S. V., Mukhortov V. M., Yuzyuk Y. I. Polarization of thin barium-strontium titanate films by an external electric field, *Tech. Phys.*, 2011, vol. 56, no. 8, pp. 1175–1180.
2. Ishikawa K., Yoshikawa K., Okada N. Size effect on the ferroelectric phase transition in PbTiO_3 ultrafine particles, *Phys. Rev. B*, 1988, vol. 37, no. 10, pp. 5852–5855.
3. Scott J. F. Phase transitions in ferroelectric thin films, *Phase Transitions*, 1991, vol. 30, no. 1–4, pp. 107–110.
4. Blinov L. M., Fridkin V. M., Palto S. P., Bune A. V., Dowben P. A., Ducharme S. Dvumernye segnetoelektriki, *Uspekhi Fiz. Nauk*, 2000, vol. 170, no. 3, pp. 247 (in Russian).
5. Shut V. N., Syrtsov S. R., Trublovsky V. L. Ferroelectric properties of compositionally graded BST ceramics, *Phase Transitions*, 2010, vol. 83, no. 5, pp. 368–377.
6. Park W. Y., Hwang C. S. Film-thickness-dependent Curie-Weiss behavior of $(\text{Ba}, \text{Sr})\text{TiO}_3$ thin-film capacitors having Pt electrodes, *Appl. Phys. Lett.*, 2004, vol. 85, no. 22, pp. 5313–5315.
7. Lookman A., McAneney J., Bowman R. M., Gregg J. M., Kut J., Rios S., Ruediger A., Dawber M., Scott J. F. Effects of poling, and implications for metastable phase behavior in barium strontium titanate thin film capacitors, *Appl. Phys. Lett.*, 2004, vol. 85, no. 21, pp. 5010–5012.
8. Komandin G. A., Mukhortov V. M., Porodinkov O. E., Spektor I. E. Dielectric response of $(\text{Ba}, \text{Sr})\text{TiO}_3$ thin films in a terahertz and IR ranges, *Phys. Solid State*, 2013, vol. 55, no. 2, pp. 288–292.
9. Yoon Y.-K., Kenney J. S., Hunt A. T., Allen M. G. Low-loss microelectrodes fabricated using reverse-side exposure for a tunable ferroelectric capacitor application, *J. Micromechanics Microengineering*, 2006, vol. 16, no. 2, pp. 225–234.
10. Subramanian M. A., Shannon R. D., Chai B. H. T., Abraham M. M., Wintersgill M. C. Dielectric constants of BeO , MgO , and CaO using the two-terminal method, *Phys. Chem. Miner.*, 1989, vol. 16, no. 8, pp. 741–746.
11. Mazierska J., Ledenyov D., Jacob M. V., Krupka J. Precise microwave characterization of MgO substrates for HTS circuits with superconducting post dielectric resonator, *Supercond. Sci. Technol.*, 2005, vol. 18, no. 1, pp. 18–23.
12. Brehov K. A., Lavrov S. D., Afanas'ev M. S., Sherstjuk N. Je., Mishina E. D., Kimel A. V. Nano- i Mikrosistemnaya Tekhnika, 2014, no. 4, pp. 12–14. (in Russian).

УДК 539.23-022.53

DOI: 10.17587/nmst.20.561-575

П. А. Александров, д-р физ.-мат. наук, e-mail: alexandrov_pa@nrcki.ru,
директор Института информационных технологий НИЦ "Курчатовский институт",
В. И. Жук, канд. физ.-мат. наук, вед. науч. сотр., e-mail: vict-zh@yandex.ru,
В. Л. Литвинов, д-р физ.-мат. наук, вед. науч. сотр.,
НИЦ "Курчатовский институт", Москва

О ПРИМЕНЕНИИ ТРАНЗИСТОРНОЙ КВАДРАТНОЙ ТРЕХСТРОЧНОЙ МАТРИЦЫ ДЛЯ РЕЗЕРВИРОВАНИЯ ЦИФРОВЫХ ИНТЕГРАЛЬНЫХ СХЕМ ПРИ ИХ ОБЛУЧЕНИИ

Поступила в редакцию 23.04.2018

Приведен анализ транзисторной трехстрочной матрицы, представляющей девятикратно резервированный транзистор, т. е. содержащий девять одиночных транзисторов. Предложена аналитическая оценка отказоустойчивости микросхемы, построенной на девятикратно резервированных транзисторах, при ее облучении. Показано, что отказоустойчивость девятикратно резервированной микросхемы при ее облучении на порядок выше отказоустойчивости квадрированной микросхемы при условии, что типы дефектов в одиночных транзисторах одинаковы.

Ключевые слова: наноэлектроника, микроэлектроника, отказоустойчивость, отказ, резервирование, квадрирование, квадрированный транзистор, транзисторная матрица, девятикратно резервированный транзистор

Введение

Способы постоянного покомпонентного дублирования цифровыхnano- и микроинтегральных схем (ИС) без проверки правильности результата,

предложенные нами в работах [1–7], при облучении позволяют увеличить отказоустойчивость дублированных микросхем более, чем на 10 порядков по сравнению с нерезервированными микросхемами

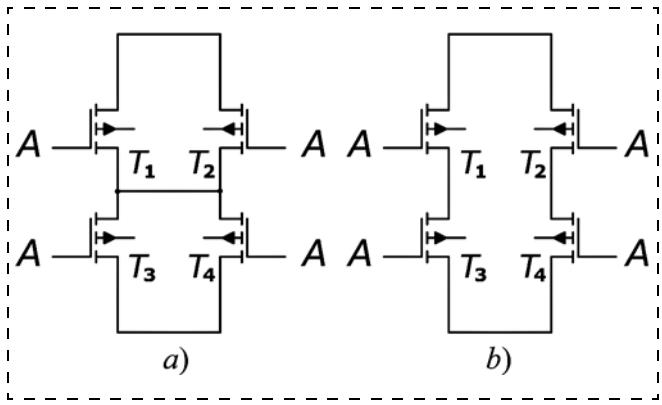


Рис. 1. Два варианта схемы квадрированного транзистора
Fig. 1. Two variants of the circuit of the quadrated transistor

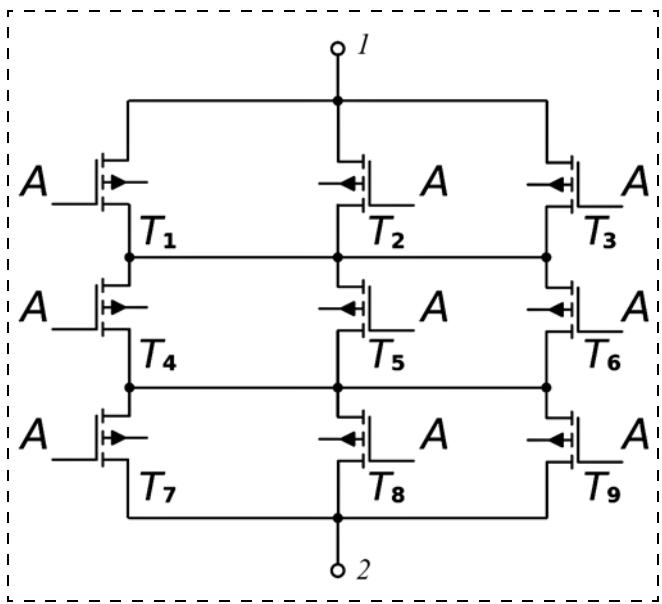


Рис. 2. Девятикратно резервированный транзистор
Fig. 2. Ninefold redundant transistor

ми, и примерно на порядок по сравнению с мажоритарно-троированными микросхемами [6].

Дальнейшее повышение отказоустойчивости цифровых нано- и микроИС возможно при использовании способов построения микросхем на транзисторных структурах, представляющих квадратную N -строчную матрицу ($N \geq 2$), элементами которой являются одиночные транзисторы [8, 9]. Такие структуры в работах [8, 9] называют N^2 -транзисторными структурами при $N = 2, 3, \dots, k$. В работе [9] эту структуру при $N = 2$ называют *quadded transistor structure* (можно назвать ее *учетверенной* или *четырехкратно резервированной* транзисторной структурой), а при $N = 3$ — *nona-transistor structure* (девятикратно резервированной транзисторной структурой). В работе [10] построение четырехкратно резервированной транзисторной структуры (т. е. при $N = 2$) мы назвали квадрированием тран-

зисторов, а саму эту структуру — квадрированным транзистором.

На рис. 1, *a* и *b* показаны два варианта квадрированного транзистора, построенного на одиночных полевых транзисторах T_1, T_2, T_3 и T_4 . Входы *A* этих одиночных транзисторов соединены между собой, что на этих рисунках не показано.

N^2 -транзисторная структура при $N = 3$ по существу является девятикратно резервированным транзистором. На рис. 2 показана схема девятикратно резервированного транзистора, построенного на одиночных транзисторах T_1, T_2, \dots, T_9 .

При использовании таких способов резервирования транзисторов логические схемы в микросхемах строятся из квадрированных или из девятикратно резервированных транзисторов. Как видно из рис. 1, *a*, *b* и рис. 2, квадрированный транзистор представляет собой квадратную двухстрочную матрицу, а девятикратно резервированный транзистор — квадратную трехстрочную матрицу, причем элементами этих матриц являются одиночные транзисторы.

В работах [8, 9] не рассматриваются вероятности отказа N^2 -транзисторных структур и цифровых нано- и микроИС в зависимости от их облучения. В дальнейшем для упрощения, как и в работах [1—7, 10], будем называть эти ИС микросхемами.

В работе [10] нами исследована отказоустойчивость квадрированных микросхем, т. е. микросхем, построенных на квадрированных транзисторах. При этом показано, что квадрированные микросхемы с одинаковыми типами дефектов ("короткое замыкание" (КЗ) или "обрыв") в одиночных транзисторах по сравнению с покомпонентно дублированными микросхемами обеспечивают существенное уменьшение вероятности отказа (на один-два порядка) при облучении. Наиболее существенное снижение вероятности отказа квадрированных микросхем по сравнению с покомпонентно дублированными микросхемами достигается в случае, когда квадрированные транзисторы отказывают вследствие неодинаковых типов дефектов в одиночных транзисторах.

В настоящей работе исследуется отказоустойчивость микросхем, построенных на транзисторных квадратных трехстрочных матрицах, т. е. на девятикратно резервированных транзисторах, при облучении. Транзисторную микросхему, построенную на девятикратно резервированных транзисторах, будем называть девятикратно резервированной.

Отметим, что в данной работе, как и в работах [1—7, 10] под отказом понимаются как постоянные отказы, так и временные, называемые сбоями. Для оценки вероятностей отказов при облучении микросхемы в данной работе будет использован предложенный нами метод оценки отказоустойчивости

Таблица 1
Table 1

Номер тройки <i>Numbers of the groups of three</i>	Тройка <i>Groups of three</i>	Номер тройки <i>Numbers of the groups of three</i>	Тройка <i>Groups of three</i>	Номер тройки <i>Numbers of the groups of three</i>	Тройка <i>Groups of three</i>
1	1, 4, 7	10	2, 4, 7	19	3, 4, 7
2	1, 4, 8	11	2, 4, 8	20	3, 4, 8
3	1, 4, 9	12	2, 4, 9	21	3, 4, 9
4	1, 5, 7	13	2, 5, 7	22	3, 5, 7
5	1, 5, 8	14	2, 5, 8	23	3, 5, 8
6	1, 5, 9	15	2, 5, 9	24	3, 5, 9
7	1, 6, 7	16	2, 6, 7	25	3, 6, 7
8	1, 6, 8	17	2, 6, 8	26	3, 6, 8
9	1, 6, 9	18	2, 6, 9	27	3, 6, 9

Отказывающие тройки одиночных транзисторов ($r = 3$). Можно показать, что при $r = 3$

$$G_{3, \text{K3}} = 3^3 = 27. \quad (2)$$

В табл. 1 приведены отказывающие тройки (т. е. отказывающие комбинации при $r = 3$) одиночных транзисторов при дефектах типа КЗ. В табл. 1 указаны номера одиночных транзисторов, указанные на рис. 2.

Отказывающие четверки одиночных транзисторов ($r = 4$). Отказывающая четверка одиночных транзисторов образуется, если в любой строке трехстрочной транзисторной матрицы выбрать пару одиночных транзисторов, включить эту пару в отказывающую четверку и добавить в нее по одному одиночному транзистору из двух других строк этой матрицы.

В каждой строке этой матрицы имеем по три пары одиночных транзисторов, а во всей трехстрочной матрице имеем девять таких пар. Каждой такой паре соответствуют девять вариантов комбинаций отказавших транзисторов, входящих по одному в оставшиеся строки этой матрицы. Отсюда

$$G_{4, \text{K3}} = n \times v_2 = 9 \times 9 = 81, \quad (3)$$

где n — число пар одиночных транзисторов в трех строках матрицы, по три в каждой строке, т. е. $n = 9$; v_2 — число вариантов комбинаций отказавших транзисторов, входящих по одному в две строки этой матрицы; $v_2 = 9$.

Отказывающие пятерки одиночных транзисторов ($r = 5$). Отказывающая пятерка одиночных транзисторов в трехстрочной транзисторной матрице образуется двумя путями, рассмотренными ниже.

1. В отказывающую пятерку включают три одиночных транзистора любой строки этой матрицы и

"по площадям" [1—7, 10]. Как и при квадрировании транзисторов [10], одна частица может вызвать отказ не одного, а двух соседних одиночных транзисторов, входящих в один девятикратно резервированный транзистор. Микросхема выходит из строя, если откажет один ее девятикратно резервированный транзистор.

1. Комбинации одиночных транзисторов в одном девятикратно резервированном транзисторе и понятие отказывающей комбинации этих транзисторов

Отказ одного или любых двух одиночных транзисторов не вызовет отказа девятикратно резервированного транзистора (см. рис. 2), или, иначе говоря, трехстрочной квадратной транзисторной матрицы, поскольку не сможет ни разорвать, ни закоротить цепь между полюсами 1 и 2 этого девятикратно резервированного транзистора.

При облучении девятикратно резервированного транзистора в нем могут образовываться комбинации из r отказавших одиночных транзисторов при $r = 3, 4, \dots, 8$. Однако отказ этого девятикратно резервированного транзистора возможен при отказе некоторых определенных комбинаций из r одиночных транзисторов.

Максимальное число $G_{r, \text{max}}$ комбинаций из r одиночных транзисторов в k -транзисторной матрице будет равно числу сочетаний из k по r .

$$G_{r, \text{max}} = C_k^r = k!/[r!(k-r)!]. \quad (1)$$

Значения величины $G_{r, \text{max}}$, полученные согласно (1) при $k = 9$ и $r = 3, 4, \dots, 8$, приведены ниже:

r	3	4	5	6	7	8
$G_{r, \text{max}}$ при $k = 9$	84	126	126	84	26	9

Комбинацию из r одиночных транзисторов, при отказе которых отказывает девятикратно резервированный транзистор, будем называть отказывающей.

В последующих разделах приведены числа отказывающих комбинаций одиночных транзисторов при одинаковых типах их дефектов (КЗ и "обрыв") при разных значениях r .

2. Отказывающие комбинации одиночных транзисторов при дефектах типа КЗ в них

Обозначим через $G_{r, \text{K3}}$ число отказывающих комбинаций из r одиночных транзисторов при дефектах типа КЗ в девятикратно резервированном транзисторе. При дефектах типа КЗ во всех одиночных транзисторах отказывающей комбинации цепь между полюсами 1 и 2 в схеме девятикратно резервированного транзистора должна быть замкнута.

комбинацию из двух транзисторов, по одному из двух остальных строк этой матрицы. Получается, что для одной строки этой матрицы имеется девять таких двухтранзисторных комбинаций. Число отказывающих пятерок, образованных первым путем, будет

$$G_{5,\text{кз}}^{(1)} = s \times v_2 = 3 \times 9 = 27, \quad (4)$$

где s — число строк матрицы, $s = 3$; v_2 — число двухтранзисторных комбинаций в каждой строке этой матрицы.

2. В отказывающую пятерку включают по паре транзисторов из двух любых строк матрицы и по одному транзистору из оставшейся строки. В каждой строке матрицы по три пары транзисторов, поэтому число комбинаций пар транзисторов в двух строках матрицы будет $3^2 = 9$. Каждой такой комбинации соответствуют три варианта одиночных транзисторов из строки, в которой пары транзисторов не задаются. Поэтому число отказывающих пятерок, образованных вторым путем, будет

$$G_{5,\text{кз}}^{(2)} = s(k_n \times v) = 3(9 \times 3) = 81, \quad (5)$$

где s — число строк матрицы, $s = 3$; k_n — число комбинаций пар транзисторов в двух строках матрицы, $k_n = 9$; v — число вариантов транзисторов из строки, в которой пары транзисторов не задаются, $v = 3$.

3. Общее число отказывающих пятерок будет

$$G_{5,\text{кз}} = G_{5,\text{кз}}^{(1)} + G_{5,\text{кз}}^{(2)} = 27 + 81 = 108. \quad (6)$$

Отказывающие шестерки одиночных транзисторов ($r = 6$). Отказывающая шестерка одиночных транзисторов в трехстрочной транзисторной матрице образуется также двумя путями, рассмотренными ниже.

1. В отказывающую шестерку включаются по паре транзисторов из каждой строки этой матрицы. В каждой строке матрицы имеется три такие пары. Число таких шестерок транзисторов равно общему числу комбинаций этих пар в матрице:

$$G_{6,\text{кз}}^{(1)} = n_1^s = 3^3 = 27, \quad (7)$$

где n_1 — число пар транзисторов в строке матрицы, $n_1 = 3$; s — число строк матрицы, $s = 3$.

2. В отказывающую шестерку включается тройка транзисторов из одной строки матрицы, пара транзисторов из другой строки матрицы и один транзистор из оставшейся строки матрицы. При выбранной тройке транзисторов, находящихся в одной строке матрицы, число комбинаций транзисторов в двух других ее строках составит $3^2 = 9$.

Число отказывающих шестерок, образованных вторым путем, будет

$$G_{6,\text{кз}}^{(2)} = s \times k_2 = 3 \times 9 = 27, \quad (8)$$

где s — число строк матрицы, $s = 3$; k_2 — число комбинаций транзисторов, взятых из двух строк матрицы при выбранной тройке транзисторов, принадлежащей одной строке матрицы, $k_2 = 9$.

3. Общее число отказывающих шестерок будет

$$G_{6,\text{кз}} = G_{6,\text{кз}}^{(1)} + G_{6,\text{кз}}^{(2)} = 27 + 27 = 54. \quad (9)$$

Отказывающие семерки одиночных транзисторов ($r = 7$). Отказывающая семерка одиночных транзисторов образуется двумя тройками транзисторов в двух строках трехстрочной транзисторной матрицы и одним транзистором из оставшейся строки. Число отказывающих семерок будет равно числу случаев, когда только в одной строке матрицы отказывает один транзистор, а в остальных ее строках отказывают все три транзистора:

$$G_{7,\text{кз}} = s \times k_1 = 3 \times 3 = 9, \quad (10)$$

где s — число строк матрицы, $s = 3$; k_1 — число транзисторов в строке матрицы.

Отказывающие восьмерки одиночных транзисторов ($r = 8$). Отказывающая восьмерка образуется из двух любых строк трехстрочной транзисторной матрицы и одной любой пары транзисторов из оставшейся строки матрицы:

$$G_{8,\text{кз}} = s \times n_1 = 3 \times 3 = 9, \quad (11)$$

где s — число строк матрицы, $s = 3$; n_1 — число пар транзисторов в строке матрицы, $n_1 = 3$.

3. Относительные вероятности попадания частиц в отказывающие комбинации одиночных транзисторов при дефектах в них типа КЗ

Относительная вероятность попадания частиц в отказывающие комбинации из r транзисторов при дефектах в них типа КЗ будет

$$\mu_{r,\text{кз}} = G_{r,\text{кз}} / G_{r,\text{max}}, \quad (12)$$

где все величины определены выше (в разд. 1).

В табл. 2 указаны значения величин $G_{r,\text{max}}$, $G_{r,\text{кз}}$ и $\mu_{r,\text{кз}}$ при всех значениях r .

Таблица 2
Table 2

r	3	4	5	6	7	8
$G_{r,\text{max}}$	84	126	126	84	36	9
$G_{r,\text{кз}}$	27	81	108	54	9	9
$\mu_{r,\text{кз}}$	0,32	0,64	0,86	0,64	0,25	1

Таблица 3
Table 3

r	3	4	5	6	7	8
$\mu_{r, \text{кз}}$	0,32	0,64	0,86	0,64	0,25	1
$\mu_{r, \text{кз}}^*$	0,32	0,44	0,48	0,33	0,17	0,83
$(1 - \mu_{r, \text{кз}}^*)$	0,68	0,56	0,52	0,67	0,83	

Для удобства изложения комбинацию из r транзисторов будем называть r -комбинацией. Поскольку наиболее вероятно, что транзисторы в r -комбинации под действием излучения отказывают не одновременно, а по мере попадания в них частиц, то сначала могут, например, отказать транзисторы, входящие в $(r - 1)$ -комбинацию при $r \geq 4$. В этом случае трехстрочная матрица транзисторов выйдет из строя, и поэтому отказ остальных транзисторов, входящих в отказывающую комбинацию, можно не рассматривать. Строго говоря, для учета порядка отказов транзисторов в их отказывающей комбинации нужно учесть все перестановки в каждой отказывающей комбинации, считая их равновероятными. Это очень осложнит расчет относительных вероятностей выхода из строя отказывающих комбинаций транзисторов. Однако вместо учета порядка отказов транзисторов в их отказывающей комбинации ниже предлагается учитывать относительную вероятность того, что предыдущая, $(r - 1)$ -я, отказывающая комбинация транзисторов не вышла из строя.

Для этого введем величину $\mu_{r, \text{кз}}^*$ — относительную вероятность попадания частиц в отказывающую комбинацию из r транзисторов, в которой не вышла из строя предыдущая $(r - 1)$ -комбинация при $r \geq 4$:

$$\mu_{r, \text{кз}}^* = (1 - \mu_{r-1, \text{кз}}^*)\mu_{r, \text{кз}}, \quad (13)$$

где $\mu_{3, \text{кз}}^* = \mu_{3, \text{кз}}$ при $r = 4$. В частности, с учетом (13) получим

$$\mu_{4, \text{кз}}^* = (1 - \mu_3)\mu_{4, \text{кз}},$$

$$\mu_{5, \text{кз}}^* = (1 - \mu_{4, \text{кз}}^*)\mu_{5, \text{кз}} = (1 - \mu_{4, \text{кз}} + \mu_{3, \text{кз}}\mu_{4, \text{кз}}),$$

$$\mu_{6, \text{кз}}^* = (1 - \mu_{5, \text{кз}}^*)\mu_{6, \text{кз}} = (1 - \mu_{5, \text{кз}} + \mu_{4, \text{кз}}\mu_{5, \text{кз}} - \mu_{3, \text{кз}}\mu_{4, \text{кз}}\mu_{5, \text{кз}})\mu_{6, \text{кз}}.$$

В табл. 3 сведены значения величин $\mu_{r, \text{кз}}$, $\mu_{r, \text{кз}}^*$ и $(1 - \mu_{r, \text{кз}}^*)$ при всех значениях r .

4. Вероятность отказа облучаемой цифровой микросхемы при отказах типа КЗ в одиночных транзисторах

При облучении девятикратно резервированной микросхемы, построенной на девятикратно ре-

зервированных транзисторах, частицы могут последовательно поразить 3, 4, 8 транзисторов в любом девятикратно резервированном транзисторе, или иначе говоря, в трехстрочной транзисторной матрице. С учетом этого вероятность отказа такой девятикратно резервированной микросхемы при отказах типа КЗ в одиночных транзисторах будет

$$P_{\text{м,кз}} = (\mu_{3, \text{кз}} P_{1-9}^3 / G_{3, \text{кз}} + \mu_{4, \text{кз}}^* P_{1-9}^4 / G_{4, \text{кз}} + \mu_{5, \text{кз}}^* P_{1-9}^5 / G_{5, \text{кз}} + \mu_{6, \text{кз}}^* P_{1-9}^6 / G_{6, \text{кз}} + \mu_{7, \text{кз}}^* P_{1-9}^7 / G_{7, \text{кз}} + \mu_{8, \text{кз}}^* P_{1-9}^8 / G_{8, \text{кз}}) / N_9, \quad (14)$$

где P_{1-9} — вероятность отказа одиночного транзистора в девятикратно резервированной микросхеме, в которой в одиночных транзисторах возможны только дефекты типа КЗ; N_9 — число девятикратно резервированных транзисторов в микросхеме; остальные величины определены выше.

Подставив значения величин $\mu_{3, \text{кз}}$, $\mu_{r, \text{кз}}^*$ и $G_{r, \text{кз}}$ при $r = 4, 5, \dots, 8$ из табл. 2 и 3 в (14), после преобразований получим

$$P_{\text{м,кз}} = (0,012 P_{1-9}^3 + 0,005 P_{1-9}^4 + 0,004 P_{1-9}^5 + 0,006 P_{1-9}^6 + 0,019 P_{1-9}^7 + 0,092 P_{1-9}^8) / N_9. \quad (15)$$

5. Отказывающие комбинации одиночных транзисторов при дефектах типа "обрыв" в них

Обозначим через $G_{r, \text{обр}}$ — число отказывающих комбинаций из r одиночных транзисторов ($r = 3, 4, \dots, 8$) при дефектах типа "обрыв" в девятикратно резервированном транзисторе (см. рис. 2). При дефектах типа "обрыв" во всех одиночных транзисторах отказывающей комбинации цепь между полюсами 1 и 2 в схеме девятикратно резервированного транзистора должна быть разомкнута.

В табл. 4 показаны **отказывающие тройки (при $r = 3$)** транзисторов при дефектах в них типа "обрыв". В этих комбинациях транзисторы представлены их номерами.

Из табл. 4 следует, что

$$G_{3, \text{обр}} = 3. \quad (16)$$

Отказывающая четверка (при $r = 4$) образуется, если включить в нее отказывающую тройку, ука-

Таблица 4
Table 4

Номер комбинации Combination number	Отказывающая тройка Failing group of three
1	1, 2, 3
2	4, 5, 6
3	7, 8, 9

занную в любой строке трехстрочной транзисторной матрицы, и добавить к ней один транзистор из любой другой строки этой матрицы. В результате получим

$$G_{4,\text{обр}} = G_{3,\text{обр}} \times (s - 1) \times k_1 = \\ = 3 \times (3 - 1) \times 3 = 18, \quad (17)$$

где s — число строк указанной матрицы; k_1 — число транзисторов в одной ее строке.

Отказывающая пятерка (при $r = 5$) образуется двумя путями.

1. В отказывающую пятерку включается отказывающая тройка, указанная в любой строке трехстрочной транзисторной матрицы, и пара транзисторов из любой другой строки этой матрицы:

$$G_{5,\text{обр}}^{(1)} = G_{3,\text{обр}} \times (s - 1) \times n_1 = \\ = 3 \times (3 - 1) \times 3 = 18, \quad (18)$$

где n_1 — число пар транзисторов в строке указанной матрицы; $n_1 = 3$; остальные величины определены выше.

2. В отказывающую пятерку включается отказывающая тройка, указанная в любой строке матрицы, и по одному транзистору из каждой другой строки этой матрицы:

$$G_{5,\text{обр}}^{(2)} = G_{3,\text{обр}} \times (s - 1) \times k_1 = \\ = 3 \times (3 - 1) \times 3 = 18, \quad (19)$$

где все величины определены выше.

3. Общее число отказывающих пятерок будет

$$G_{5,\text{обр}} = G_{5,\text{обр}}^{(1)} + G_{5,\text{обр}}^{(2)} = 18 + 18 = 36. \quad (20)$$

Отказывающая шестерка (при $r = 6$) образуется двумя путями.

1. В отказывающую шестерку включаются любые две отказывающие тройки:

$$G_{6,\text{обр}}^{(1)} = k_{\text{пар.стр}} = 3, \quad (21)$$

где $k_{\text{пар.стр}}$ — число пар отказывающих троек (строк матрицы).

2. В отказывающую шестерку включаются одна любая отказывающая тройка (т. е. из любой строки), пара транзисторов из любой другой строки и один транзистор из еще не использовавшейся строки, т. е. из строки, из которой не брали отказывающуюся тройку или пару транзисторов:

$$G_{6,\text{обр}}^{(2)} = G_{3,\text{обр}} \times (s - 1) \times n_1 \times k_1 = \\ = 3 \times (3 - 1) \times 3 \times 3 = 54, \quad (22)$$

где все величины определены выше.

3. Общее число отказывающих шестерок будет

$$G_{6,\text{обр}} = G_{6,\text{обр}}^{(1)} + G_{6,\text{обр}}^{(2)} = 3 + 54 = 57. \quad (23)$$

Отказывающая семерка (при $r = 7$) образуется включением в нее любых двух отказывающих троек, расположенных в двух строках матрицы, и один любой транзистор из оставшейся строки этой матрицы:

$$G_{7,\text{обр}} = k_{\text{пар.стр}} \times k_1 = 3 \times 3 = 9, \quad (24)$$

где все величины определены выше.

Отказывающая восьмерка (при $r = 8$) образуется включением в нее двух любых отказывающих троек, расположенных в двух строках матрицы, и любую пары транзисторов из оставшейся строки:

$$G_{8,\text{обр}} = k_{\text{пар.стр}} \times n_1 = 3 \times 3 = 9, \quad (25)$$

где все величины определены выше.

6. Относительные вероятности попадания частиц в отказывающие комбинации одиночных транзисторов при дефектах в них типа "обрыв"

Относительные вероятности попадания частиц в отказывающие комбинации одиночных транзисторов при дефектах в них типа "обрыв" вычисляются аналогично тому, как это делается при дефектах типа КЗ.

Относительная вероятность попадания частицы в отказывающую комбинацию из r одиночных транзисторов при их отказах типа "обрыв" в одном девятикратно резервированном транзисторе будет

$$\mu_{r,\text{обр}} = G_{r,\text{обр}} / G_{r,\text{max}}, \quad (26)$$

где все величины определены выше.

По аналогии с (13) введем величину $\mu_{r,\text{обр}}^*$ — относительную вероятность попадания частиц в отказывающую комбинацию из r транзисторов, в которой не вышла из строя предыдущая $(r - 1)$ -комбинация при $r \geq 4$:

$$\mu_{r,\text{обр}}^* = (1 - \mu_{r-1,\text{обр}}^*) \mu_{r,\text{обр}}, \quad (27)$$

где $\mu_{3,\text{обр}}^* = \mu_{3,\text{обр}}$ при $r = 4$.

В табл. 5 сведены значения величин $G_{r,\text{max}}$, $G_{r,\text{обр}}$, $\mu_{r,\text{обр}}$, $\mu_{r,\text{обр}}^*$ и $(1 - \mu_{r,\text{обр}}^*)$ при всех значениях r .

Таблица 5
Table 5

r	3	4	5	6	7	8
$G_{r,\text{max}}$	84	126	126	84	36	9
$G_{r,\text{обр}}$	3	18	36	57	9	9
$\mu_{r,\text{обр}}$	0,036	0,143	0,286	0,679	0,25	1
$(1 - \mu_{r,\text{обр}}^*)$	0,964	0,857	0,714	0,321	0,75	
$\mu_{r,\text{обр}}^*$	0,036	0,138	0,245	0,485	0,08	0,75

7. Вероятность отказа микросхемы, построенной на девятикратно резервированных транзисторах, при отказах типа "обрыв" в одиночных транзисторах

По аналогии с (14) вероятность отказа такой девятикратно резервированной микросхемы при отказах типа "обрыв" в одиночных транзисторах будет

$$P_{M,\text{обр}} = (\mu_{3,\text{обр}} P_{1-9}^3 / G_{3,\text{обр}} + \mu_{4,\text{обр}}^* P_{1-9}^4 / G_{4,\text{обр}} + \\ + \mu_{5,\text{обр}}^* P_{1-9}^5 / G_{5,\text{обр}} + \mu_{6,\text{обр}}^* P_{1-9}^6 / G_{6,\text{обр}} + \\ + \mu_{7,\text{обр}}^* P_{1-9}^7 / G_{7,\text{обр}} + \mu_{8,\text{обр}}^* P_{1-9}^8 / G_{8,\text{обр}}) / N_9, \quad (28)$$

где все величины определены выше.

Подставив значения величин $\mu_{3,\text{обр}}$, $\mu_{r,\text{обр}}^*$ и $G_{r,\text{обр}}$ при $r = 4, 5, \dots, 8$ из табл. 5 в (28), после преобразований получим

$$P_{M,\text{обр}} = (0,012 P_{1-9}^3 + 0,008 P_{1-9}^4 + 0,007 P_{1-9}^5 + \\ + 0,009 P_{1-9}^6 + 0,009 P_{1-9}^7 + 0,008 P_{1-9}^8) / N_9. \quad (29)$$

8. Вероятность отказа микросхемы, построенной на девятикратно резервированных транзисторах, при одинаковых типах дефектов в одиночных транзисторах

При $P_{1-9} \ll 1$ из (15) и (25) следует, что $P_{M,\text{кз}} = P_{M,\text{обр}} = P_{9M}$:

$$P_{9M} = 0,012 \cdot P_{1-9}^3 / N_9, \quad (30)$$

где P_{9M} — вероятность отказа девятикратно резервированной микросхемы при одинаковых типах дефектов (КЗ или "обрыв") в одиночных транзисторах; остальные величины определены выше.

Вероятность P_{1-9} отказа одиночного транзистора в девятикратно резервированной микросхеме при ее облучении по аналогии с формулами (1)–(3) в [10] будет

$$P_{1-9} = \Phi_9 \cdot S_9 \cdot W, \quad (31)$$

где Φ_9 — флюенс для девятикратно резервированной микросхемы; S_9 — площадь девятикратно резервированной микросхемы; W — вероятность повреждения единицы площади микросхемы при попадании в нее частицы, определенная в работе [5, (1)–(12), с. 12, 13].

Площадь S_9 без учета площади внешних соединений представим в виде:

$$S_9 = s_{0,t} \cdot N_{0,t-9}, \quad (32)$$

где $s_{0,t}$ — площадь одного одиночного транзистора; $N_{0,t-9}$ — число одиночных транзисторов в девятикратно резервированной микросхеме.

Подставим (32) в (31):

$$P_{1-9} = \Phi_9 \cdot s_{0,t} \cdot N_{0,t-9} \cdot W. \quad (33)$$

Подставив (33) в (30), получим вероятность P_{9M} облучаемой девятикратно резервированной микросхемы при одинаковых типах дефектов (КЗ или "обрыв") в одиночных транзисторах:

$$P_{9M} = 0,012 \cdot (\Phi_9 \cdot s_{0,t} \cdot N_{0,t-9} \cdot W)^3 / N_9. \quad (34)$$

9. Сравнение отказоустойчивости квадрированной и девятикратно резервированной микросхем при облучении

Найдем показатель α_{M-9M} изменения отказоустойчивости:

$$\alpha_{M-9M} = P_M / P_{9M}, \quad (35)$$

где P_{9M} — вероятность отказа девятикратно резервированной микросхемы, определенная в (34); P_M — вероятность отказа квадрированной микросхемы с квадрированными логическими элементами без резервирования их структуры, определенная в работе [10, (3)–(9)]:

$$P_M = \mu \cdot (\Phi_{KB} \cdot s_{0,t} \cdot N_{0,t} \cdot W)^2 / (N_{KB} \cdot G_{max}), \quad (36)$$

где μ — относительная вероятность попадания частицы в отказывающую пару одиночных транзисторов в квадрированном транзисторе, $\mu = 1/3$, либо $2/3$; Φ_{KB} — флюенс квадрированной микросхемы; $N_{0,t}$ — число одиночных транзисторов в квадрированной микросхеме; N_{KB} — число квадрированных транзисторов в квадрированной микросхеме; G_{max} — максимальное число любых пар одиночных транзисторов в квадрированном транзисторе, $G_{max} = 6$; остальные величины определены выше.

В квадрированной микросхеме

$$N_{0,t} = 4 \cdot N_{KB}. \quad (37)$$

В девятикратно резервированной микросхеме

$$N_{0,t-9} = 9 \cdot N_9, \quad (38)$$

где N_9 — число девятикратно резервированных транзисторов в микросхеме.

Примем, что

$$N_9 = N_{KB} = N, \quad (39)$$

где N — число транзисторов в нерезервированной микросхеме.

Примем, что площади $s_{o.t}$ в девятикратно резервированной, квадрированной и нерезервированной микросхемах одинаковы и при этом площадь S нерезервированной микросхемы равна 1 см². Тогда

$$s_{o.t} = 1/N. \quad (40)$$

В качестве примера согласно работе [5, с. 12, 13] возьмем $W = 1,5 \cdot 10^{-7}$.

Оценим ограничения флюенсов Φ_{kv} и Φ_9 сверху с учетом этого значения W и формул (37)–(40).

Согласно [10, (3.3)] имеем

$$P_1 = \Phi_{kv} \cdot s_{ot} \cdot N_{o.t} \cdot W < 1, \quad (41)$$

где P_1 — вероятность отказа одиночного транзистора в квадрированной микросхеме; $N_{o.t}$ — число одиночных транзисторов в квадрированной микросхеме, определенное в (37).

С учетом (39) и (40) получим

$$s_{ot} \cdot N_{o.t} = 4. \quad (42)$$

Из (41) с учетом (42) найдем, что

$$\begin{aligned} \Phi_{kv} &< 1/(4 \cdot W) = 1/(4 \cdot 1,5 \cdot 10^{-7}) = \\ &= 1,67 \cdot 10^6. \end{aligned} \quad (43)$$

Ограничение флюенса Φ_9 сверху найдем из условия

$$P_{1-9} < 1, \quad (44)$$

где P_{1-9} — вероятность P_{1-9} отказа одиночного транзистора в девятикратно резервированной микросхеме при ее облучении, определенная в (33).

С учетом (33), (38)–(40) из (44) получим

$$\Phi_9 < 1/(9 \cdot W) = 1/(9 \cdot 1,5 \cdot 10^{-7}) = 0,74 \cdot 10^6. \quad (45)$$

Для упрощения с учетом (44) и (45) примем, что

$$\Phi_9 = \Phi_{kv} = 10^5. \quad (46)$$

С учетом (46), (34), (36–40), $G_{max} = 6$, $W = 1,5 \cdot 10^{-7}$, $\mu = 1/3$ из (35) получим $\alpha_{M-9M} = 6,8$, а при тех же данных и $\mu = 2/3$ получим $\alpha_{M-9M} = 13,6$.

При этом $P_M = 2 \cdot 10^{-10}$ при $\mu = 1/3$ и $P_M = 4 \cdot 10^{-10}$ при $\mu = 2/3$, а $P_{9M} = 29,53 \cdot 10^{-12}$.

Таким образом, девятикратное резервирование транзисторов по сравнению с их квадрированием позволяет увеличить отказоустойчивость микросхемы примерно на порядок при одинаковых типах дефектов в одиночных транзисторах.

Заключение

Показано, что девятикратно резервированные микросхемы, выполненные на трехстрочных тран-

зисторных матрицах, по сравнению с квадрированными микросхемами без резервирования структур логических элементов позволяют увеличить отказоустойчивость микросхемы примерно на порядок при одинаковых типах дефектов в одиночных транзисторах. Но при неодинаковых типах дефектов отказоустойчивость девятикратно резервированных микросхем существенно возрастает. Однако девятикратное резервирование транзисторов по сравнению с их квадрированием требует увеличения числа транзисторов в 2,25 раза.

Список литературы

1. Александров П. А., Жук В. И., Литвинов В. Л. Способ постоянного поэлементного дублирования в дискретных электронных системах (варианты). Патент РФ на изобретение № 2475820 от 10.08.2011, классы МПК G06F 11/16, H03K 19/007.
2. Александров П. А., Бударгин В. В., Жук В. В., Литвинов В. Л., Свечников А. Б. Действие излучений на материалы, приборы и схемы наноэлектроники // Ядерная физика и инжиниринг. 2013. Том 4, № 6. С. 590–596.
3. Александров П. А., Бударгин В. В., Жук В. В., Литвинов В. Л. Об отказоустойчивостиnanoэлектронных интегральных схем при облучении // Нано- и микросистемная техника. 2014. № 1. С. 7–14.
4. Александров П. А., Жук В. И., Литвинов В. Л. Наноэлектроника и радиация // Природа. 2015. № 1. С. 14–21.
5. Александров П. А., Бударгин В. В., Жук В. И., Литвинов В. Л. Отказоустойчивость покомпонентно дублированной микросхемы при облучении // Нано- и микросистемная техника. 2015. № 3. С. 10–23.
6. Александров П. А., Бударгин В. В., Жук В. И., Литвинов В. Л. Сравнительные оценки отказоустойчивости ма-жоритарно резервированных и покомпонентно дублированных микросхем при облучении // Нано- и микросистемная техника. 2016. № 3. С. 176–196.
7. Александров П. А., Бударгин В. В., Горемыкин А. М., Жук В. И., Литвинов В. Л. О построении дублированных логических элементов для повышения отказоустойчивости микросхем при облучении // Нано- и микросистемная техника. 2016. № 4. С. 239–256.
8. Aiman H. Maleh, Bashir M. Al-Hashimir, Aissa Melouki. Transistor-Level Based Defect-Tolerance for Reliable Nanoelectronics. Computer Systems and Applications, 2008. AICCSA 2008. IEEE/ACS International Conference (31 March–4 April 2008). P. 53–60. http://www.ccse.kfupm.edu.sa/~aimane/pub/Transistor-Level%20Based%20Defect-Tolerance%20for%20Reliable%20Nanoelectronics_AICCSA-08.pdf
9. Aiman H. Maleh, Bashir M. Al-Hashimir, Aissa Melouki, Farhan Khan. Defect Tolerant N²- Transistor Structure for Reliable Nanoelectronic Designs. — IET Computers & Digital Techniques, Volume 3, Issue 6. November 2009. — Page 570–580. (with Appendix). http://eprints.soton.ac.uk/267678/1/IET_DefectTolerantStrucureNanoelectronics.pdf
10. Александров П. А., Жук В. И., Литвинов В. Л., Стельмах С. Е. О квадрировании транзисторов в нано- и микрочиповых интегральных схемах при их облучении // Нано- и микросистемная техника. 2018. Т. 24, № 2. С. 111–124.

P. A. Aleksandrov, D. Sc., Director, **V. I. Zhuk**, Ph. D. Leading Researcher, vict-zh@yandex.ru,
V. L. Litvinov, D. Sc. Leading Researcher,
Institute of Information Technologies, National Research Center "Kurchatov Institute", Moscow, 123182,
Russian Federation

Corresponding author:

Zhuk Victor I., Ph. D., Leading Researcher, Institute of Information Technologies, National Research Center "Kurchatov Institute", Moscow, 123182, Russian Federation, vict-zh@yandex.ru

On the Application of a Transistor Square 3-line Matrix for Redundancy in Digital Nano- and Microintegrated Circuits under Irradiated

Received on April 23, 2018
Accepted on May 17, 2018

The analysis of transistor square 3-line matrix, representing ninefold redundant transistor, is presented. The analytic investigation of fault-tolerance of irradiation nano- and microintegrated circuits based on ninefold redundant transistors by employing approximative model "by the areas" for assessment of the fault probability of the irradiated microcircuits is implemented. The estimation of the fault probability of ninefold redundant microcircuits under irradiation is proposed.

It is shown that ninefold redundant transistor microcircuits, i.e. that usage one of ninefold redundant transistor consisting of nine single transistors instead each single transistor, on condition of equal defect types in each single transistor, achieves substantial decrease of the fault probability on the irradiated microcircuit by one order below than the fault probability of the irradiated quadrated microcircuit. But on condition of unequal defect types in each single transistor, the fault probability of the irradiated ninefold redundant transistor microcircuits substantially decreases in comparison with the fault probability on condition of equal defect types in each single transistor.

Keywords: nanoelectronics, microelectronics, fault-tolerance, failure, redundancy, quadrating, quadrated transistor, transistor matrix, ninefold redundant transistor

For citation:

Aleksandrov P. A., Zhuk V. I., Litvinov V. L. On the Application of a Transistor Square 3-line Matrix for Redundancy in Digital Nano- and Microintegrated Circuits under Irradiated, *Nano- i Mikrosistemnaya Tekhnika*, 2018, vol. 20, no. 9, pp. 561–575.

DOI: 10.17587/nmst.20.561-575

Introduction

The methods of constant component-wise duplication of the digital nano- and microintegrated circuits (IC) without checking of correctness of the results, offered by us in [1–7], during an irradiation, allow to increase the fault tolerance of the duplicated microcircuits by more than 10 orders in comparison with the nonredundant microcircuits, and approximately 10 times in comparison with the majority-triplicated microcircuits [6].

The further increase of the fault tolerance of the digital nano- and micro — IC is possible due to the use of construction of the microcircuits on the transistor structures representing a square N -line matrix ($N \geq 2$), the elements of which are single transistors [8, 9]. In [8, 9] such structures are called N^2 -transistor structures at $N = 2, 3, \dots, k$. In [9] this structure at $N = 2$ is called *quadded transistor structure* (a possible name is a quadruple or quadruply redundant structure), and at $N = 3$ —

nona-transistor structure (ninefold redundant transistor structure). In [10] the construction of the quadruply redundant transistor structure (i. e. at $N = 2$) we called quadrature of transistors, and structure itself — a quadrated transistor.

Fig. 1, *a* and *b* present two versions of a quadrated transistor constructed on the single field transistors T_1 , T_2 , T_3 and T_4 . Inputs A of these single transistors are connected among themselves, which is not shown in the figures.

At $N = 3$ the N^2 -transistor structure, in fact, is a ninefold redundant transistor. Fig. 2 presents a circuit of the ninefold redundant transistor constructed of single field transistors T_1 , T_2 , ..., T_9 .

During the use of such methods of redundancy of the transistors the logic circuits in the microcircuits are constructed of the quadrated or ninefold redundant transistors. As one can see (fig. 1, *a*, *b* and fig. 2), a quadrated transistor is a square two-line matrix, while the ninefold redundant transistor — a quadrated three-

line matrix, while the elements of these matrixes are single transistors.

In [8, 9] a probability of failure of N^2 -transistor structures and digital nano- and micro- IC, depending on their irradiation, is not considered. Further, for simplification reasons, just like in [1–7, 10], we will call these IC "microcircuits".

In [10] we investigated the fault tolerance of the quadrated microcircuits, i.e. the microcircuits constructed on the quadrated transistors. We demonstrated, that the quadrated microcircuits with the equal types of defects ("short circuit" (SC) or "open circuit") in the single transistors in comparison with the component-wise duplicated microcircuits, under irradiation, ensure reduction of the failure probability (by one or two orders). The most essential decrease of the failure probability of the quadrated microcircuits in comparison with the component-wise duplicated microcircuits is reached, when the quadrated transistors fail due to unequal types of defects in the single transistors.

The present work is dedicated to the fault tolerance of the microcircuits constructed on three-line square matrixes, i.e. on the ninefold redundant transistors, under irradiation. The transistor microcircuit constructed on the ninefold redundant transistors we will call the ninefold redundant one.

We should point out that in the given work, just like in [1–7, 10], failures are understood as both constant failures and temporary failures, called upsets. For estimation of the probabilities of failures under a microcircuit irradiation in the given work we will use our method for estimation of a fault tolerance "by the areas". Just like in case of the quadrature of transistors [10], one particle can cause a failure of not one, but two neighboring single transistors, which are a part of one ninefold redundant transistor. A microcircuit fails, if one of its ninefold redundant transistors does.

1. Combinations of the single transistors in one ninefold redundant transistor and the concept of a failing combination of these transistors

Failure of one or any two single transistors will not cause a failure of a ninefold redundant transistor (fig. 2), or, in other words, of a three-line square transistor matrix, because it cannot break a circuit, or make a short circuit between poles 1 and 2 of this ninefold redundant transistor.

Under an irradiation of a ninefold redundant transistor certain combinations from r of the failed single transistors may appear in it at $r = 3, 4, \dots, 8$. However, a failure of this ninefold redundant transistor is possible in case of a failure of certain combinations of r single transistors.

The maximal number of $G_{r,\max}$ combinations from r single transistors in a k -transistor matrix will be equal to the number of combinations from k on r .

$$G_{r,\max} = C_k^r = k!/[r! \cdot (k - r)!]. \quad (1)$$

The values of $G_{r,\max}$, received according to (1) at $k = 9$ and $r = 3, 4, \dots, 8$, are presented below:

r	3	4	5	6	7	8
$G_{r,\max}$ at $k = 9$	84	126	126	84	26	9

A combination of r single transistors, which causes a failure of a ninefold redundant transistor, we will call the failing combination.

The subsequent sections present the numbers of the failing combinations of the single transistors at identical types of their defects (SC and "breakage") at different values of r .

2. Failing combinations of the single transistors at defects of SC type in them

Let us designate through $G_{r,k3}$ the number of the failing combinations from r single transistors in case of SC defects in a ninefold redundant transistor. In case of SC defects, in all single transistors of a failing combination, the circuit between poles 1 and 2 in the circuit of the ninefold redundant transistor should be closed.

Failing groups of three of the single transistors ($r = 3$). It is possible to show, that at $r = 3$

$$G_{3,k3} = 3^3 = 27. \quad (2)$$

Table 1 presents the failing groups of three (the combinations failing at $r = 3$) of the single transistors in case of defects of SC type.

The failing groups of four of the single transistors ($r = 4$). A failing group of four single transistors is formed, if in any line of the 3-line transistor matrix we select a pair of single transistors, include this pair in the failing group of four and add to it one single transistor from each of the other two lines of this matrix.

In each line of this matrix we have three pairs of the single transistors, and in all the 3-line matrix we have 9 such pairs. To each pair 9 variants of combinations of the failing transistors (one from each of the remaining lines of this matrix) correspond. Thus:

$$G_{4,k3} = n \times v_2 = 9 \times 9 = 81, \quad (3)$$

where n — number of pairs of the single transistors in three lines of the matrix, three in each line, i.e. $n = 9$; v_2 — number of variants of combinations of the failed transistors, one of each in two lines of this matrix; $v_2 = 9$.

Failing groups of five of the single transistors ($r = 5$).

A failing group of five of the single transistors in a three-line transistor matrix is formed in two ways considered below.

1. A failing group of five includes three single transistors of any line of this matrix and a combination of two transistors, one of each two remaining lines of this matrix. It turns out, that for one line of the matrix we have nine such two-transistor combinations. The number of the failing groups of five, formed in the first way, will be:

$$G_{5,K3}^{(1)} = s \times v_2 = 3 \times 9 = 27, \quad (4)$$

where s — number of lines in the matrix, $s = 3$; v_2 — number of two-transistor combinations in each line of this matrix.

2. A failing group of five includes two transistors from any two lines of the matrix and one transistor from the remaining line. In each line of the matrix there are three pairs of transistors, therefore, the number of combinations of the pairs of transistors in two lines of the matrix will be $3^2 = 9$. To each such combination three variants of the single transistors correspond from a line, in which the pairs of transistors are not set. Therefore, the number of the failing groups of five formed in the second way, will be:

$$G_{5,K3}^{(2)} = s(k_n \times v) = 3(9 \times 3) = 81, \quad (5)$$

where s — number of lines of the matrix, $s = 3$; k_n — number of combinations of the pairs of transistors in two lines of the matrix, $k_n = 9$; v — number of variants of transistors from the line, in which the pairs of transistors are not set, $v = 3$.

3. The total number of the failing groups of five will be

$$G_{5,K3} = G_{5,K3}^{(1)} + G_{5,K3}^{(2)} = 27 + 81 = 108. \quad (6)$$

Failing groups of six single transistors ($r = 6$).

A failing group of six single transistors in a three-line transistor matrix is formed also in two ways considered below.

1. A failing group of six includes a pair of transistors from every line of this matrix. Each line of the matrix has three such pairs. The number of such groups of six transistors is equal to the total number of combinations of these pairs in the matrix:

$$G_{6,K3}^{(1)} = n_1^s = 3^3 = 27, \quad (7)$$

where n_1 — number of pairs of transistors in a line of the matrix, $n_1 = 3$; s — number of lines in the matrix, $s = 3$.

2. A failing group of six includes three transistors from one line of the matrix, a pair of transistors from another line of the matrix and one transistor from the remaining line of the matrix. In case the selected group is of three transistors, which are in one line of the matrix, the number of the combinations of the transistors in two of its other lines will be $3^2 = 9$. The number of the failing groups of six formed in the second way will be:

$$G_{6,K3}^{(2)} = s \times k_2 = 3 \times 9 = 27, \quad (8)$$

where s — number of lines of the matrix, $s = 3$; k_2 — number of the combinations of the transistors taken from two lines of the matrix at the chosen group of three transistors, belonging to one line of the matrix, $k_2 = 9$.

3. The total number of the failing groups of six will be:

$$G_{6,K3} = G_{6,K3}^{(1)} + G_{6,K3}^{(2)} = 27 + 27 = 54. \quad (9)$$

Failing groups of seven single transistors ($r = 7$).

A failing group of seven single transistors is formed by two groups of three transistors in two lines of a three-line transistor matrix and one transistor from the remaining line. The number of the failing groups of seven will be equal to the number of cases, when only one transistor fails in one line of the matrix, and in its other lines all three transistors fail:

$$G_{7,K3} = s \times k_1 = 3 \times 3 = 9, \quad (10)$$

where s — number of lines of the matrix, $s = 3$; k_1 — number of transistors in a line of the matrix.

Failing groups of eight single transistors ($r = 8$).

A failing group of eight is formed of two any lines of the 3-line transistor matrix and any one pair of transistors from the remaining line of the matrix.

$$G_{8,K3} = s \times n_1 = 3 \times 3 = 9, \quad (11)$$

where s — number of lines of the matrix, $s = 3$; n_1 — number of pairs of transistors in a line of the matrix, $n_1 = 3$.

3. Relative probabilities of the particles' hitting into the failing combinations of the single transistors in case of defects of SC type

A relative probability of the particles' hitting into the failing combinations of r transistors in case of the defects of SC type in them will be:

$$\mu_{r,K3} = G_{r,K3}/G_{r,\max}, \quad (12)$$

where all the values were determined above (in section 1).

Table 2 presents the values of $G_{r,\max}$, $G_{r,K3}$ and $\mu_{r,K3}$ at all values of r .

For convenience of presentation, we will call a combination of r transistors as r -combination. Since it is most probable, that the transistors in r -combination under the influence of radiation fail not simultaneously, but in the process of the particles hitting them, first, for example, the transistors fail in $(r - 1)$ -combination at $r \geq 4$. In this case the three-line matrix of transistors will fail, and, consequently, a failure of the other transistors in the failing combination does not have to be considered. Strictly speaking, for the account of the order of failures of the transistors in their failing combination it is necessary to consider all the shifts in each failing combination, considering them as equiprobable. This will complicate very much the calculation of the relative probabilities of failure of the failing combinations of the transistors. However, instead of the account of the order of failures of the transistors in their failing combination, below it is proposed to consider a relative probability that the previous, $(r - 1)$ -th failing combination of the transistors, did not fail.

For this purpose we will introduce value of $\mu_{r,K3}^*$ — relative probability of particles' hitting into a failing combination from r transistors, in which the previous $(r - 1)$ one at $r \geq 4$ did not fail:

$$\mu_{r,K3}^* = (1 - \mu_{r-1,K3}^*)\mu_{r,K3}, \quad (13)$$

where $\mu_{3,K3}^* = \mu_{3,K3}$ at $r = 4$.

In particular, with account of (13) we will get:

$$\begin{aligned} \mu_{4,K3}^* &= (1 - \mu_{3,K3})\mu_{4,K3}, \\ \mu_{5,K3}^* &= (1 - \mu_{4,K3}^*)\mu_{5,K3} = \\ &= (1 - \mu_{4,K3} + \mu_{3,K3}\mu_{4,K3}), \\ \mu_{6,K3}^* &= (1 - \mu_{5,K3}^*)\mu_{6,K3} = (1 - \mu_{5,K3} + \mu_{4,K3}\mu_{5,K3} - \\ &\quad - \mu_{3,K3}\mu_{4,K3}\mu_{5,K3})\mu_{6,K3}. \end{aligned}$$

Table 3 presents the values of $\mu_{r,K3}$, $\mu_{r,K3}^*$ and $(1 - \mu_{r,K3}^*)$ at all r .

4. Probability of failure of an irradiated digital microcircuit in case of SC failures in the single transistors

At an irradiation of a ninefold redundant microcircuit constructed on the ninefold redundant transistors, the particles can consistently hit 3, 4, 8 transistors in any ninefold redundant transistor, or speaking otherwise, in a three-line transistor matrix. Taking this into account, the probability of failure of such a ninefold re-

dundant microcircuit in case of failures of SC type in the single transistors will be:

$$\begin{aligned} P_{M,K3} = & (\mu_{3,K3} P_{1-9}^3 / G_{3,K3} + \mu_{4,K3}^* P_{1-9}^4 / G_{4,K3} + \\ & + \mu_{5,K3}^* P_{1-9}^5 / G_{5,K3} + \mu_{6,K3}^* P_{1-9}^6 / G_{6,K3} + \\ & + \mu_{7,K3}^* P_{1-9}^7 / G_{7,K3} + \mu_{8,K3}^* P_{1-9}^8 / G_{8,K3}) / N_9, \quad (14) \end{aligned}$$

where P_{1-9} — probability of failure of a single transistor in the ninefold redundant microcircuit, in the single transistors of which the defects of SC type are only possible; N_9 — number of the ninefold redundant transistors in a microcircuit; the other values were defined above.

By substituting values of $\mu_{3,K3}$, $\mu_{r,K3}^*$ and $G_{r,K3}$ at $r = 4, 5, \dots, 8$ from table 3 and 4 into (14), after transformations we will receive:

$$\begin{aligned} P_{M,K3} = & (0,012 P_{1-9}^3 + 0,005 P_{1-9}^4 + 0,004 P_{1-9}^5 + \\ & + 0,006 P_{1-9}^6 + 0,019 P_{1-9}^7 + 0,092 P_{1-9}^8) / N_9. \quad (15) \end{aligned}$$

5. Failing combinations of the single transistors in case of the "breakage" defects in them

Let us through $G_{r,\text{обр}}$ designate the number of the failing combinations from r single transistors ($r = 3, 4, \dots, 8$) in case of defects of the "breakage" type in a ninefold redundant transistor (fig. 2). In case of the "breakage" defects, in all the single transistors of the failing combination the circuit between poles 1 and 2 in the circuit of the ninefold redundant transistor will be broken.

Table 4 presents **the failing groups of three transistors (at $r = 3$)** in case of the defects of the "breakage" type in them. In these combinations the transistors are presented by their numbers

From table 5 it follows, that

$$G_{3,\text{обр}} = 3. \quad (16)$$

A failing group of four (at $r = 4$) is formed, if the failing group of three, specified in any line of a three-line transistor matrix, is included in it, and if one transistor from any other line of this matrix is added to it. As a result we will get

$$\begin{aligned} G_{4,\text{обр}} &= G_{3,\text{обр}} \times (s - 1) \times k_1 = \\ &= 3 \times (3 - 1) \times 3 = 18, \quad (17) \end{aligned}$$

where s — number of lines of the specified matrix; k_1 — number of transistors in one its line.

A failing group of five (at $r = 5$) is formed in two ways.

1. In the failing group of five, the failing group of three, specified in any line of the three-line transistor matrix, and a pair of transistors from any other line of this matrix, are included:

$$G_{5,\text{обр}}^{(1)} = G_{3,\text{обр}} \times (s - 1) \times n_1 = \\ = 3 \times (3 - 1) \times 3 = 18, \quad (18)$$

where n_1 — number of pairs of transistors in the line of the specified matrix; $n_1 = 3$; the other values were defined above.

2. In the failing group of five, the failing group of three, specified in any line of the matrix, and one transistor from each other line of this matrix, are included:

$$G_{5,\text{обр}}^{(2)} = G_{3,\text{обр}} \times (s - 1) \times k_1 = \\ = 3 \times (3 - 1) \times 3 = 18, \quad (19)$$

where all the values were defined above.

3. The total number of the failing groups of five will be:

$$G_{5,\text{обр}} = G_{5,\text{обр}}^{(1)} + G_{5,\text{обр}}^{(2)} = 18 + 18 = 36. \quad (20)$$

A failing group of six (at $r = 6$) is formed in two ways.

1. In the failing group of six any two failing groups of three are included:

$$G_{6,\text{обр}}^{(1)} = k_{\text{пар.стр}} = 3, \quad (21)$$

where $k_{\text{пар.стр}}$ — number of pairs of the failing groups of three (lines of the matrix).

2. In the failing group of six, any one failing group of three (i.e. from any line) is included, a pair of transistors from any other line and one transistor from a line, which has not been used yet, i. e. from a line, from which a failing group of three or a pair of transistors have not been taken yet:

$$G_{6,\text{обр}}^{(2)} = G_{3,\text{обр}} \times (s - 1) \times n_1 \times k_1 = \\ = 3 \times (3 - 1) \times 3 \times 3 = 54, \quad (22)$$

where all the values were defined above.

3. The total number of the failing groups of six will be:

$$G_{6,\text{обр}} = G_{6,\text{обр}}^{(1)} + G_{6,\text{обр}}^{(2)} = 3 + 54 = 57. \quad (23)$$

A failing group of seven (at $r = 7$) is formed by inclusion in it of any two failing groups of three located in two lines of the matrix, and any one transistor from the remaining line of this matrix:

$$G_{7,\text{обр}} = k_{\text{пар.стр}} \times k_1 = 3 \times 3 = 9, \quad (24)$$

where all the values were defined above.

A failing group of eight (at $r = 8$) is formed by inclusion in it of two any failing groups of three located in two lines of the matrix, and of any pair of transistors from the remaining line:

$$G_{8,\text{обр}} = k_{\text{пар.стр}} \times n_1 = 3 \times 3 = 9, \quad (25)$$

where all the values were defined above.

6. Relative probabilities of the particles' hitting into the failing combinations of the single transistors in case of the defects of the "breakage" type in them

The relative probabilities of the particles' hitting into the failing combinations of the single transistors, in case their defects are of the "breakage" type, are calculated in a way, similar to the one used in case of the defects of SC type.

The relative probability of a particle hitting into a failing combination from r single transistors, in case their failures are of the "breakage" type in one ninefold redundant transistor, will be:

$$\mu_{r,\text{обр}} = G_{r,\text{обр}} / G_{r,\text{max}}, \quad (26)$$

where all the values were defined above.

By analogy with (13) we will introduce the value of $\mu_{r,\text{обр}}^*$ — a relative probability of a particle hitting into a failing combination of r transistors, in which the previous $(r - 1)$ -combination at $r \geq 4$ did not fail:

$$\mu_{r,\text{обр}}^* = (1 - \mu_{r-1,\text{обр}}^*) \mu_{r,\text{обр}}, \quad (27)$$

where $\mu_{3,\text{обр}}^* = \mu_{3,\text{обр}}$ at $r = 4$.

Table 5 presents the values of $G_{r,\text{max}}$, $G_{r,\text{обр}}$, $\mu_{r,\text{обр}}$, $\mu_{r,\text{обр}}^*$ and $(1 - \mu_{r,\text{обр}}^*)$ at all r .

7. Probability of failure of a microcircuit constructed on a ninefold redundant transistors in case of failures of the "breakage" type in the single transistors

By analogy with (14) a probability of failure of such a ninefold redundant microcircuit in case of failures of the "breakage" type in the single transistors will be:

$$P_{M,\text{обр}} = (\mu_{3,\text{обр}} P_{1-9}^3 / G_{3,\text{обр}} + \mu_{4,\text{обр}}^* P_{1-9}^4 / G_{4,\text{обр}} + \\ + \mu_{5,\text{обр}}^* P_{1-9}^5 / G_{5,\text{обр}} + \mu_{6,\text{обр}}^* P_{1-9}^6 / G_{6,\text{обр}} + \\ + \mu_{7,\text{обр}}^* P_{1-9}^7 / G_{7,\text{обр}} + \mu_{8,\text{обр}}^* P_{1-9}^8 / G_{8,\text{обр}}) / N_9, \quad (28)$$

where all the values were defined above.

By substituting the values of $\mu_{3,\text{обр}}$, $\mu_{r,\text{обр}}^*$ and $G_{r,\text{обр}}$ at $r = 4, 5, \dots, 8$ from table 5 in (28), and after transformations we will get:

$$P_{\text{M,обр}} = (0,012 P_{1-9}^3 + 0,008 P_{1-9}^4 + 0,007 P_{1-9}^5 + \\ + 0,009 P_{1-9}^6 + 0,009 P_{1-9}^7 + 0,08 P_{1-9}^8) / N_9. \quad (29)$$

8. Probability of failure of a microcircuit constructed on the ninefold redundant transistors in case of the identical types of defects in the single transistors

At $P_{1-9} \ll 1$ out of (15) and (25) it follows that $P_{\text{M,K3}} = P_{\text{M,обр}} = P_{9\text{M}}$:

$$P_{9\text{M}} = 0,012 \cdot P_{1-9}^3 / N_9, \quad (30)$$

where $P_{9\text{M}}$ — probability of failure of a ninefold redundant microcircuit in case of the identical types of defects (SC or "breakage") in the single transistors; the other values were defined above.

Probability P_{1-9} of failure of a single transistor in a ninefold redundant microcircuit in case of its irradiation, by analogy with formulas (1–3) in [10], will be

$$P_{1-9} = \Phi_9 \cdot S_9 \cdot W, \quad (31)$$

where Φ_9 — fluence for a ninefold redundant microcircuit; S_9 — area of a ninefold redundant microcircuit; W — probability of damage of a unit of the area of a microcircuit, when hit by a particle, defined in the work [5, (1–12), p. 12–13].

We will present the area of S_9 without the area of the external connections in the following way:

$$S_9 = s_{\text{o.T}} \cdot N_{\text{o.T-9}}, \quad (32)$$

where $s_{\text{o.T}}$ — area of one single transistor; $N_{\text{o.T-9}}$ — number of the single transistors in a ninefold redundant microcircuit.

Let us substitute (32) in (31):

$$P_{1-9} = \Phi_9 \cdot s_{\text{o.T}} \cdot N_{\text{o.T-9}} \cdot W. \quad (33)$$

By substituting (33) in (30) we will get probability $P_{9\text{M}}$ of an irradiated ninefold redundant microcircuit in case of the identical types of defects (SC or "breakage") in the single transistors:

$$P_{9\text{M}} = 0,012 \cdot (\Phi_9 \cdot s_{\text{o.T}} \cdot N_{\text{o.T-9}} \cdot W)^3 / N_9. \quad (34)$$

9. Comparison of the fault tolerance of the quadrated and ninefold redundant microcircuits under irradiation

Let us find index $\alpha_{\text{M-9M}}$ of variation of the fault tolerance:

$$\alpha_{\text{M-9M}} = P_{\text{M}} / P_{9\text{M}}, \quad (35)$$

where $P_{9\text{M}}$ — probability of failure of a ninefold redundant microcircuit, defined in (34). P_{M} — probability of failure of a quadrated microcircuit with the quadrated logic elements without redundancy of their structure, defined in [10, (3–9)]:

$$P_{\text{M}} = \mu \cdot (\Phi_{\text{KB}} \cdot s_{\text{o.T}} \cdot N_{\text{o.T}} \cdot W)^2 / (N_{\text{KB}} \cdot G_{\max}), \quad (36)$$

where μ — relative probability of a particle hitting into a failing pair of the single transistors in a quadrated transistor, $\mu = 1/3$, or $2/3$; Φ_{KB} — fluence of a quadrated microcircuit; $N_{\text{o.T}}$ — number of the single transistors in a quadrated microcircuit; N_{KB} — number of the quadrated transistors in a quadrated microcircuit; G_{\max} — maximal number of any pairs of the single transistors in a quadrated transistor, $G_{\max} = 6$; the other values were defined above.

In a quadrated microcircuit

$$N_{\text{o.T}} = 4 \cdot N_{\text{KB}}. \quad (37)$$

In a ninefold redundant microcircuit

$$N_{\text{o.T-9}} = 9 \cdot N_9, \quad (38)$$

where N_9 — number of the ninefold redundant transistors in a microcircuit.

Let us assume, that

$$N_9 = N_{\text{KB}} = N, \quad (39)$$

where N — number of transistors in a nonredundant microcircuit.

Let us assume, that the areas of $s_{\text{o.T}}$ in the ninefold redundant, quadrated and nonredundant microcircuits are identical and thus the area of S of the nonredundant microcircuit is equal to 1 cm^2 . Then

$$s_{\text{o.T}} = 1/N. \quad (40)$$

As an example, according to the work [5, p. 12–13] we take $W = 1.5 \cdot 10^{-7}$.

Let us estimate the restrictions of fluences Φ_{KB} and Φ_9 from above, taking into account the value of W and formulas (37)–(40).

According to [10, (3.3)] we have

$$P_1 = \Phi_{\text{KB}} \cdot s_{\text{o.T}} \cdot N_{\text{o.T}} \cdot W < 1, \quad (41)$$

where P_1 — probability of failure of a single transistor in a quadrated microcircuit, $N_{o.t}$ — number of the single transistors in a quadrated microcircuit defined in (37).

Taking into account (39) and (40) we will get

$$s_{o.t} \cdot N_{o.t} = 4. \quad (42)$$

From (41) and taking into account (42) we will find, that

$$\begin{aligned} \Phi_{KB} &< 1/(4 \cdot W) = 1/(4 \cdot 1.5 \cdot 10^{-7}) = \\ &= 1.67 \cdot 10^6. \end{aligned} \quad (43)$$

We will find the restriction of fluence Φ_9 from above from the following condition

$$P_{1-9} < 1, \quad (44)$$

where P_{1-9} — probability P_{1-9} of failure of a single transistor in a ninefold redundant microcircuit under its irradiation, defined in (33).

Taking into account (33), (38)—(40) from (44) we will get

$$\begin{aligned} \Phi_9 &< 1/(9 \cdot W) = 1/(9 \cdot 1.5 \cdot 10^{-7}) = \\ &= 0.74 \cdot 10^6. \end{aligned} \quad (45)$$

For simplification and taking into account (44) and (45) we will assume that

$$\Phi_9 = \Phi_{KB} = 10^5. \quad (46)$$

Taking into account (46), (34), (36—40), $G_{\max} = 6$, $W = 1.5 \cdot 10^{-7}$, $\mu = 1/3$ from (35) we will get $\alpha_{M-9M} = 6.8$, and at the same data and $\mu = 2/3$, we will receive $\alpha_{M-9M} = 13.6$.

At that, $P_M = 2 \cdot 10^{-10}$ at $\mu = 1/3$ and $P_M = 4 \cdot 10^{-10}$ at $\mu = 2/3$, and $P_{9M} = 29.53 \cdot 10^{-12}$.

Thus, the ninefold reservation of transistors in comparison with their quadration allows us to increase the fault tolerance of a microcircuit approximately 10 times in case of the identical types of defects in the single transistors.

Conclusion

It is shown that the ninefold redundant microcircuits made on the three-line transistor matrixes, in comparison with the quadrated microcircuits without redundancy of the structures of the logic elements allow us to increase the fault tolerance of a microcircuit approximately 10 times in case of the equal types of defects in the single transistors. But in case of unequal

types of the defects the fault tolerance of the ninefold redundant microcircuits increases essentially. However, the ninefold redundancy of the transistors in comparison with their quadration demands a 2.25 times increase of the number of the transistors.

References

1. Aleksandrov P. A., Zhuk V. I., Litvinov V. L. *Sposob postoyannogo poelementnogo dublirovaniya v diskretnykh elektronnykh sistemakh (varianty)*, Patent RF na izobretenie N. 2475820 ot 10.08.2011, klassy MPK G06F11/16, H03K19/007 (in Russian).
2. Aleksandrov P. A., Budaragin V. V., Zhuk V. I., Litvinov V. L., Cvechnikov A. B. Deystvie izlucheniya na materialnye, pribory i skhemy nanoelectroniki, *Yadernaya fizika i Inzhiniring*, 2013, vol. 4, no. 6, pp. 590—596 (in Russian).
3. Aleksandrov P. A., Budaragin V. V., Zhuk V. I., Litvinov V. L. Ob otkazoustochivosti nanoelectronnykh integral'nykh skhem pri obluchenii, *Nano- i Microsystemnaya Tekhnika*, 2014, no. 1, pp. 7—14 (in Russian).
4. Aleksandrov P. A., Zhuk V. I., Litvinov V. L. Nanoelectronika i radiatsia, *Priroda*, 2015, no. 1, pp. 14—21 (in Russian).
5. Aleksandrov P. A., Budaragin V. V., Zhuk V. I., Litvinov V. L. Otkazoustochivost' pokomponentno dublirovannoy microschem pri obluchenii, *Nano- i Microsystemnaya Tekhnika*, 2015, no. 3, pp. 10—23 (in Russian).
6. Aleksandrov P. A., Budaragin V. V., Zhuk V. I., Litvinov V. L. Sravnitel'nye otsenki otkazoustochivosti mazhoritarno rezervirovannykh i pokomponentno dublirovannykh microschem pri obluchenii, *Nano- i Microsystemnaya Tekhnika*, 2016, no. 3, pp. 176—196 (in Russian).
7. Aleksandrov P. A., Budaragin V. V., Goremykin A. M., Zhuk V. I., Litvinov V. L. O postroenii dublirovannykh logicheskikh elementov dlya povysheniya otkazoustochivosti microschem pri obluchenii, *Nano- i Microsystemnaya Tekhnika*, 2016, no. 4, pp. 239—256 (in Russian).
8. Aiman H. Maleh, Bashir M. Al-Hashimir, Aissa Melouki. Transistor-Level Based Defect-Tolerance for Reliable Nanoelectronics, *Computer Systems and Applications*, 2008. IEEE/ACS International Conference on, 31 March-4 April 2008, AICCSA 2008. pp. 53—60 available at: http://www.csse.kfupm.edu.sa/~aimane/pub/Transistor-Level%20Based%20Defect-Tolerance%20for%20Reliable%20Nanoelectronics_AICCSA-08.pdf
9. Maleh A. H., Al-Hashimir B. M., Melouki A., Khan F. Defect Tolerant N²-Transistor Structure for Reliable Nanoelectronic Designs, *IET Computers & Digital Techniques*, 2009, vol. 3, issue 6, pp. 570—580 (with Appendix), available at: http://eprints.soton.ac.uk/267678/1/IET_DefectTolerantStrucureNanoelectronics.pdf
10. Aleksandrov P. A., Zhuk V. I., Litvinov V. L., Stel'mak S. E. O kvadrirovaniyu transistorov v nano- i mikrotifrovyykh integral'nykh chemakh pri ikh obluchenii, *Nano- i Microsystemnaya Tekhnika*, 2018, vol. 20, no. 2, pp. 111—124 (in Russian).

Рекомендации по оформлению материалов для публикации в журнале "НАНО- И МИКРОСИСТЕМНАЯ ТЕХНИКА"

МАТЕРИАЛЫ, ПРЕДСТАВЛЯЕМЫЕ В РЕДАКЦИЮ

- Статья, оформленная в соответствии с требованиями.
- Таблицы, иллюстрации и перечень подрисуночных подписей.
- Сведения об авторах (фамилия, имя, отчество, ученая степень, место работы, занимаемая должность, домашний и служебный адреса, телефоны, факс, e-mail).
- Статья на электронном носителе.
- Англоязычная информация.

ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТЬ РАЗМЕЩЕНИЯ МАТЕРИАЛА СТАТЬИ

1. Индекс **УДК** размещается в левом верхнем углу первой страницы.
2. **Сведения об авторах** на русском языке размещаются перед названием статьи и включают инициалы и фамилию авторов с указанием их ученой степени, звания, должности и названия организации и места ее расположения (если это не следует из ее названия). Указывается также e-mail и/или почтовый адрес хотя бы одного автора или организации.
3. За **сведениями об авторах** следует **название статьи**.
4. После названия статьи отдельным абзацем дается **аннотация**, отражающая содержание статьи (что в ней рассмотрено, приведено, обосновано, предложено и т. д.).
5. Затем следуют **ключевые слова**.
6. Текст статьи.
7. Список литературы.
8. Англоязычная информация.

АНГЛОЯЗЫЧНАЯ ИНФОРМАЦИЯ

(СОГЛАСНО ТРЕБОВАНИЯМ ЗАРУБЕЖНЫХ АНАЛИТИЧЕСКИХ БАЗ ДАННЫХ):

- инициалы и фамилии каждого автора, e-mail, полное название места работы и адрес (при совпадении места работы авторов нужно указывать его один раз для всей группы авторов);
- название статьи;
- аннотация статьи объемом не менее 200 слов, написанная качественным английским языком, отражающая основное содержание статьи с указанием цели, задачи, результатов исследования и кратких выводов;
- ключевые слова (10—12 слов);
- список литературы в романском алфавите (латинице), т. е. необходимо транслитерировать на латинский шрифт (см., например, <http://translit.ru/>) инициалы и фамилии авторов, название источника публикации и место издания, а технические сокращения (номер, том, страница и т. п.) должны быть переведены с использованием общепринятых обозначений (номер — N., том — Vol., страницы — P. и т. п.).

Статья может быть отправлена по e-mail: nmst@novtex.ru с рисунками, вставленными в текстовый файл с расширением DOC.

Дополнительные пояснения авторы могут получить в редакции журнала лично, по телефонам: (499) 269-53-97, (499) 269-55-10 либо по e-mail.

АДРЕС РЕДАКЦИИ ЖУРНАЛА

107076, Г. МОСКВА, СТРОМЫНСКИЙ ПЕР., 4, ИЗДАТЕЛЬСТВО "НОВЫЕ ТЕХНОЛОГИИ"

РЕДАКЦИЯ ЖУРНАЛА "Нано- и микросистемная техника"

Тел.: (499) 269-55-10; тел./факс: (499) 269-55-10

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

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

Свидетельство о регистрации ПИ № 77-18289 от 06.09.04.

Технический редактор Т. А. Шацкая. Корректор Е. В. Комиссарова.

Сдано в набор 21.07.2018. Подписано в печать 27.08.2018. Формат 60×88 1/8. Заказ МС0918. Цена договорная
Оригинал-макет ООО «Адвансед солюшнз». Отпечатано в ООО «Адвансед солюшнз». 119071, г. Москва, Ленинский пр-т, д. 19, стр. 1. Сайт: www.aov.ru

Рисунок к статье В. Е. Пауткина, Ф. А. Абдуллина, А. Е. Мишанина
**«ИССЛЕДОВАНИЕ СТЕНОК ВЕРТИКАЛЬНЫХ КРЕМНИЕВЫХ СТРУКТУР,
СФОРМИРОВАННЫХ МЕТОДАМИ ГЛУБОКОГО BOSCH-ТРАВЛЕНИЯ»**

V. E. Pautkin, F. A. Abdullin, A. E. Mishanin
**«INVESTIGATION OF THE WALLS OF THE VERTICAL SILICON STRUCTURES
FORMED BY THE METHODS OF DEEP BOSCH PROCESS»**

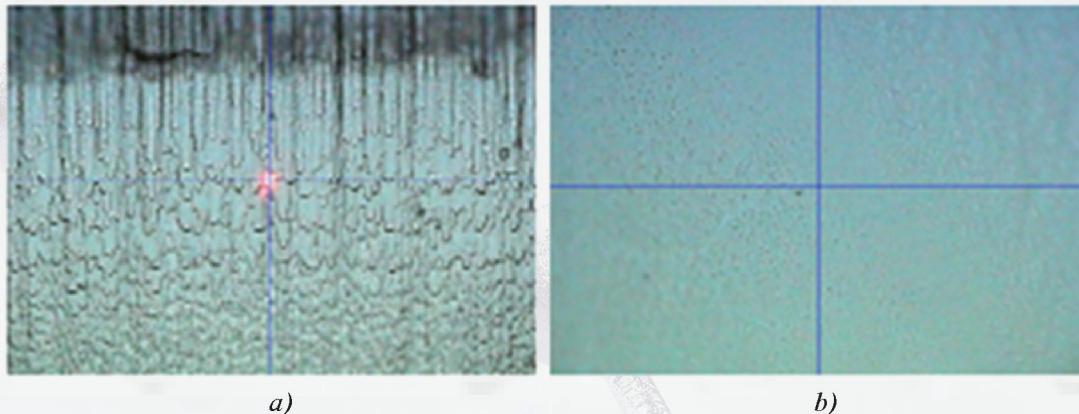


Рис. 6. Оптические фотографии травленых поверхностей кремния
до химической полировки (а) и после химической полировки (б)

Fig. 6. Optical photos of the etched silicon surfaces before the chemical polishing (a),
and after the chemical polishing (b)

Рисунок к статье К. А. Брехова
**«НАПРЯЖЕННОСТЬ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПОЛЯ В ПЛАНАРНОМ КОНДЕНСАТОРЕ
НА ОСНОВЕ ТОНКОЙ СЕГНЕТОЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ПЛЕНКИ BaSrTiO₃»**

K. A. Brekhov
**«ELECTRIC FIELD INTENSITY IN A PLANAR CAPACITOR BASED
ON THIN BaSrTiO₃ FERROELECTRIC FILM»**

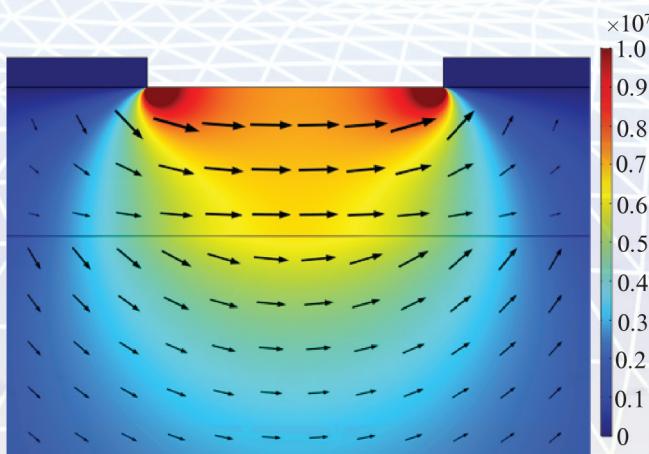


Рис. 2. Распределение напряженности электрического поля в межэлектродном пространстве при приложении напряжения к электродам (стрелками показаны направление и значение вектора напряженности электрического поля E ; цветовая температура соответствует модулю x -компоненты E_x)

Fig. 2. Distribution of the electric field intensity in the interelectrode space during application of voltage to the electrodes (the arrows show the direction and the value of the vector of the electric field intensity E ; the color temperature corresponds to E_x component absolute value)



МЕЖДУНАРОДНЫЙ ФОРУМ МИКРОЭЛЕКТРОНИКА 2018

1-6 октября 2018 г.
г. Алушта
(Республика Крым)

Международный Форум «Микроэлектроника - 2018»

Приглашает Вас и Ваших сотрудников принять участие в Международной научной конференции:
«Микроэлектроника - ЭКБ и электронные модули»

Задачи Форума: комплексно рассмотреть актуальные вопросы разработки, производства и применения отечественной электронной компонентной базы и высокointегрированных модулей.

ПРИ ПОДДЕРЖКЕ



ОРГАНИЗАТОРЫ



Генеральный информационный партнёр



Оператор Форума: Компания «ПрофКонференции» • Тел.: +7 (495) 641-57-17 • Факс: +7 (495) 641-57-17 • E-mail: info@microelectronica.pro
Подробная информация и регистрация участников на официальном сайте Форума: microelectronica.pro