

ISSN 1813-8586

НАНО-И МИКРОСИСТЕМНАЯ ТЕХНИКА

Том 19. № 12. 2017

- 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. 19, N. 12, 2017

The articles are published
in Russian and English

Рисунок к статье Б. Г. Путинцева

**«РАЗРАБОТКА ОДНОКРИСТАЛЬНЫХ ПРИЕМОПЕРЕДАЮЩИХ
МОДУЛЕЙ V-ДИАПАЗОНА НА НИТРИДЕ ГАЛЛИЯ»**

B. G. Putintsev

«DESIGN OF A GAN-BASED SINGLE-CHIP V-BAND TX/RX MODULE»

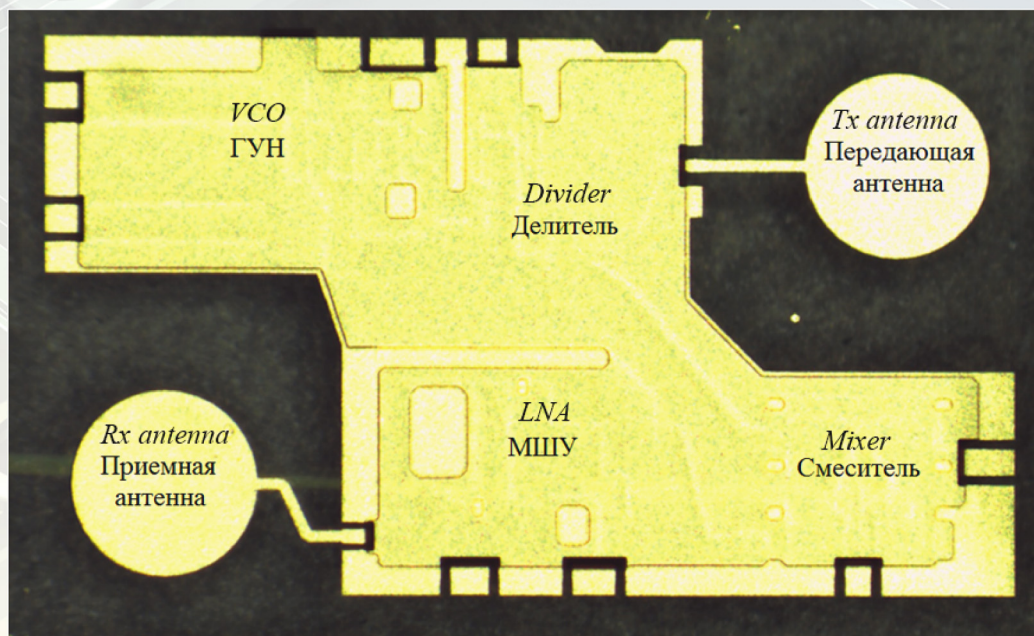


Рис. 5. Фотография изготовленных МИС

Fig. 5. Photo of the manufactured MIC

Рисунок к статье А. О. Гасникова, М. И. Ершова, В. В. Трушляковой, Е. А. Макаревой

«ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ЭЛЕКТРОННОГО ПУЧКА С ЯЧЕЙКОЙ ПАМЯТИ КРИСТАЛЛА ИМС»

A. O. Gasnikov, M. I. Ershov, V. V. Trushlyakova, E. A. Makarevskaya

«INTERACTION OF AN ELECTRON BEAM WITH A MEMORY CELL OF AN IC CRYSTAL»

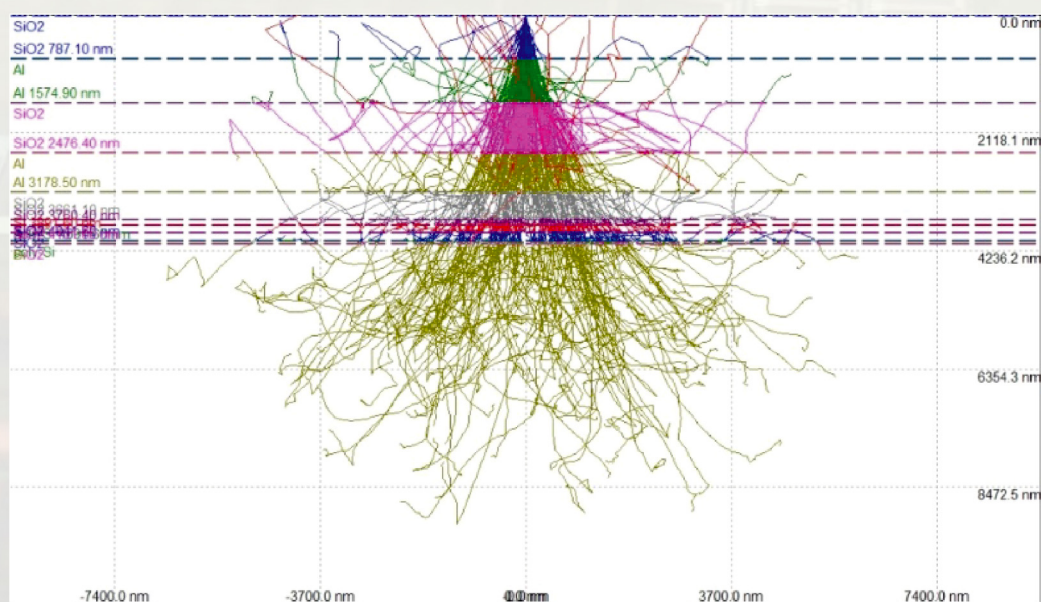


Рис. 2. Взаимодействие электронного пучка с образцом при 30 кэВ и нормальном падении

Fig. 2. Interaction with the sample at 30 keV and normal incidence of the electron beam

НАНО- и МИКРОСИСТЕМНАЯ ТЕХНИКА

Том 19. № 12 ♦ 2017

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 и в перечень научных и научно-технических изданий ВАК России по техническим, физико-математическим и химическим наукам.

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

Издается с 1999 г.

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:

Агеев О. А., д.т.н., проф., чл.-кор. РАН

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

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

Гапонов С. В., д.ф.-м.н., проф., акад. РАН

Грибов Б. Г., д.х.н., чл.-кор. РАН

Каляев И. А., д.т.н., проф., акад. РАН

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

Климов Д. М., д.т.н., проф., акад. РАН

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

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

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

Нарайкин О. С., д.т.н., проф., чл.-кор. РАН

Никитов С. А., д.ф.-м.н., проф., чл.-кор. РАН

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

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.

Быков В. А., д.т.н., проф.

Викулин В. В., к.х.н., д.т.н., проф.

Горнев Е. С., д.т.н., проф.

Градецкий В. Г., д.т.н., проф.

Кальнов В. А., к.т.н.

Карякин А. А., д.х.н., проф.

Колобов Ю. Р., д.т.н., проф.

Кузин А. Ю., д.т.н., проф.

Леонович Г. И., д.т.н., проф.

Панич А. Е., д.т.н., проф.

Петросянц К. О., д.т.н., проф.

Петрунин В. Ф., д.ф.-м.н., проф.

Пожежа К., д.ф.-м.н. (Литва)

Путилов А. В., д.т.н., проф.

Рыжий М. В., д.т.н., проф. (Япония)

Телец В. А., д.т.н., проф.

Тимошенков С. П., д.т.н., проф.

Тодуа П. А., д.т.н., проф.

Хабибуллин Р. А., к.ф.-м.н.

Шашкин В. И., д.ф.-м.н., проф.

Шептунов С. А., д.т.н., проф.

Шубарев В. А., д.т.н., проф.

Редакция:

Антонов Б. И. (директор изд.-ва)

Лысенко А. В. (отв. секретарь)

Григорин-Рябова Е. В.

Чугунова А. В.

Фокин В. А., к.х.н. (ред. перевода)

Щетинкин Д. А. (сайт)

СОДЕРЖАНИЕ

МОДЕЛИРОВАНИЕ И КОНСТРУИРОВАНИЕ МНСТ

Тимошенков С. П., Шалимов А. С., Головинский М. С., Калутин В. В., Коробова Н. Е., Тимошенков А. С., Анчутин С. А. Маршрут проектирования МЭМС-акселерометра, оптимизированного по выбранным параметрам для обеспечения возможности самокалибровки 707

Абрамов И. И., Коломейцева Н. В., Лабунов В. А., Романова И. А. Моделирование полевых графеновых транзисторов с одним и двумя затворами 714

Ларионов Ю. В., Озерин Ю. В. Вариация значений ширины выступов при измерении их в низковольтном РЭМ 422

Путинцев Б. Г. Разработка однокристалльных приемопередающих модулей V-диапазона на нитриде галлия 729

ЭЛЕМЕНТЫ МНСТ

Масальский Н. В. Широкополосный фотонный фазовый модулятор на структуре "кремний на изоляторе" 737

Морозов А. И. Магниторезистивная память с записью электрическим полем на основе упругого взаимодействия слоев 744

Гасников А. О., Ершов М. И., Трушлякова В. В., Макаревская Е. А. Взаимодействия электронного пучка с ячейкой памяти кристалла ИМС 752

Мухуров Н. И., Гасенкова И. В., Андрухович И. М., Застенкер Г. Н., Борождкова Н. Л., Каримов Б. Т. Датчики потоков космической плазмы с прецизионными селективирующими элементами 757

Указатель статей, опубликованных в журнале "Нано- и микросистемная техника" в 2017 г. 766

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 Роспечати (индекс 79493);

по каталогу "Пресса России" (индекс 27849)

в редакции журнала (тел./факс: (499) 269-55-10)

Адрес для переписки:

107076 Москва,

Стромынский пер., д. 4

e-mail: nmst@novtex.ru

Учредитель:

Издательство "Новые технологии"

NANO- and MICROSYSTEMS TECHNOLOGY

(Title "NANO- I MIKROSISTEMNAYA TEKHNIKA")

ISSN 1813-8586 DOI: 10.17587/issn1813-8586

Vol. 19

No. 12

2017

Maltsev P. P., Dr. Sci. (Tech.), Prof. — **CHIEF EDITOR**
Luchinin V. V., Dr. Sci. (Tech.), Prof.

DEPUTY CHIEF EDITOR

Shur M. S., Dr. Sci. (Phys.-Math.), Prof. (USA) —
DEPUTY CHIEF EDITOR

Editorial council:

Ageev O. A., Dr. Sci. (Tech.), Prof., Cor.-Mem. RAS
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
Gaponov S. V., Dr. Sci. (Phys.-Math.), Prof., Cor.-Mem. RAS
Gribov B. G., Dr. Sci. (Chem.), Cor.-Mem. RAS
Kaljaev I. A., Dr. Sci. (Tech.), Prof., Acad. RAS
Klimov D. M., Dr. Sci. (Tech.), Prof., Acad. RAS
Kovalchuk M. V., Dr. Sci. (Phys.-Math.), Prof., Cor.-Mem. RAS
Kvardakov V. V., Dr. Sci. (Phys.-Math.), Prof., Cor.-Mem. RAS
Kuljchin Yu. N., Dr. Sci. (Phys.-Math.), Prof., Acad. RAS
Labunov V. A., (Belorussia), Sci. (Tech.), Acad. NASB
Narajkin O. S., Dr. Sci. (Tech.), Prof., Cor.-Mem. RAS
Nikitov S. A., Dr. Sci. (Phys.-Math.), Prof., Cor.-Mem. RAS
Ryzhii V. I., Dr. Sci. (Phys.-Math.), Prof., Cor.-Mem. RAS
Surov 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.
Bykov V. A., Dr. Sci. (Tech.), Prof.
Gornev E. S., Dr. Sci. (Tech.), Prof.
Gradetskiy V. G., Dr. Sci. (Tech.), Prof.
Kalnov V. A., Cand. Sci. (Tech.)
Karjakin A. A., Dr. Sci. (Chem.), Prof.
Khabibullin R. A., Cand. Sci. (Phys.-Math.)
Kolobov Ju. R., Dr. Sci. (Tech.), Prof.
Kuzin A. U., Dr. Sci. (Tech.), Prof.
Leonovich G. I., Dr. Sci. (Tech.), Prof.
Panich A. E., Dr. Sci. (Tech.), Prof.
Petrosjants C. O., Dr. Sci. (Tech.), Prof.
Petrinin V. F., Dr. Sci. (Phys.-Math.), Prof.
Pozhela K. (Lithuania), Dr. Sci. (Phys.-Math.)
Putilov A. V., Dr. Sci. (Tech.), Prof.
Ryzhii M. V., (Japan), Dr. Eng., Prof.
Shubarev V. A., Dr. Sci. (Tech.), Prof.
Shashkin V. I., Dr. Sci. (Phys.-Math.), Prof.
Sheptunov S. A., Dr. Sci. (Tech.), Prof.
Telets V. A., Dr. Sci. (Tech.), Prof.
Timoshenkov S. P., Dr. Sci. (Tech.), Prof.
Todua P. A., Dr. Sci. (Tech.), Prof.
Vikulov V. V., Cand. Chem. Sci., Dr. Sci. (Tech.), Prof.

Editorial staff:

Antonov B. I. (Director Publ.)
Lysenko A. V. (Executive secretary)
Chugunova A. V.
Grigorin-Ryabova E. 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

MODELLING AND DESIGNING OF MNST

Timoshenkov S. P., Shalimov A. S., Golovinsky M. S., Kalugin V. V., Korobova N. E., Timoshenkov A. S., Anchutin S. A. Design Route of the MEMS Accelerometer Optimized by the Functional Parameters Aimed to Ensure a Self-Calibration 711

Abramov I. I., Kolomejtseva N. V., Labunov V. A., Romanova I. A. Simulation of Graphene Field-Effect Transistors with the Single and Dual Gates 718

Larionov Yu. V., Ozerin Yu. V. Variation of the Linewidth Values during Measurements in a Low-Voltage SEM 726

Putintsev B. G. Design of a GaN-based Single-Chip V-band Tx/Rx Module 734

MICRO- AND NANOSYSTEM TECHNIQUE ELEMENTS

Masalsky N. V. The Broadband Photon Phase Modulator ON Structure "Silicon on Insulator" 741

Morosov A. I. Magnetoresistive Memory with Recording by the Electric Field on the Basis of the Elastic Interaction of Layers 748

Gasnikov A. O., Ershov M. I., Trushlyakova V. V., Makarevskaya E. A. Interaction of an Electron Beam with a Memory Cell of an IC Crystal 755

Mukhurov N. I., Gasenkova I. V., Andrukhovich I. M., Zastenker G. N., Borodkova L. N., Karimov B. T. Space Plasma Stream Sensors with Precision Selecting Elements 763

Index of articles published in the journal "NANO and MICRO-SYSTEM TECHNIQUE" in 2017 766

Our:

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

To subscribe, please contact with:

JSC "MK-Periodica":
Tel: +7 (495) 672-7012
Fax: +7 (495) 306-3757
E-mail: import@periodicals.ru

МОДЕЛИРОВАНИЕ И КОНСТРУИРОВАНИЕ МНСТ MODELLING AND DESIGNING OF MNST

УДК 621.3.049.771.14

DOI: 10.17587/nmst.19.707-713

С. П. Тимошенков, д-р техн. наук, проф., зав. каф, e-mail: spt@miee.ru,
А. С. Шалимов, канд. техн. наук, науч. сотр., доц. каф., e-mail: 85e@mail.ru,
М. С. Головинский, инженер, e-mail: maxim1112010@mail.ru,
В. В. Калугин, д-р техн. наук, проф., e-mail: viktor118@mail.ru,
Н. Е. Коробова, д-р хим. наук, проф., e-mail: korobova3@mail.ru,
А. С. Тимошенков, канд. техн. наук, науч. сотр., доц., e-mail: porcuapa@gmail.com,
С. А. Анчутин, вед. инженер, e-mail: step305@mail.ru

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования
"Национальный исследовательский университет "Московский институт электронной техники"

МАРШРУТ ПРОЕКТИРОВАНИЯ МЭМС-АКСЕЛЕРОМЕТРА, ОПТИМИЗИРОВАННОГО ПО ВЫБРАННЫМ ПАРАМЕТРАМ ДЛЯ ОБЕСПЕЧЕНИЯ ВОЗМОЖНОСТИ САМОКАЛИБРОВКИ

Поступила в редакцию 10.06.2017

Предложен маршрут проектирования МЭМС-акселерометра, позволяющий достигнуть оптимального значения одного или нескольких функциональных параметров, что имеет наибольшее значение при решении задачи самокалибровки. Приведен пример реализации данного маршрута для разработки датчика, предназначенного для измерения малых вибраций.

Ключевые слова: преобразователь линейного ускорения, МЭМС-акселерометр, самокалибровка датчиков

Введение

Как известно, МЭМС-акселерометр может быть описан с помощью набора функциональных параметров, причем некоторые из них по своим численным значениям являются взаимоисключающими друг друга. Это обуславливает необходимость компромисса в выборе параметров, который может быть достигнут только при рассмотрении конкретной области применения акселерометра и, следовательно, при решении задачи, перед ним поставленной. В настоящее время спектр задач для подобных датчиков достаточно широк. Поскольку сведения, касающиеся теоретических основ и практических примеров реализации значительно различаются, маршрут проектирования для одной и той же прикладной задачи может сильно варьироваться в зависимости от реального технологического процесса, свойств применяемых материалов и ре-

жимов работы оборудования. Поэтому разработка универсального маршрута проектирования, позволяющего оптимизировать МЭМС-акселерометр по одному или нескольким функциональным параметрам, несомненно, является актуальной [1], особенно при необходимости реализации функции самокалибровки.

В данной работе делается попытка реализовать подобный маршрут и применить его для разработки МЭМС-акселерометра, предназначенного для измерения малых вибраций, амплитуда которых составляет порядка 100 mg и выполнения функции порогового устройства.

В настоящее время акселерометры для измерения вибрации [2, 3] находят применение в охраняемых системах, имеющих своей целью зафиксировать факт появления малой вибрации на контролируемой территории, что соответствует шагам человека, и обеспечить срабатывание сигнализации.

Ключевым элементом МЭМС-акселерометра является его чувствительный элемент. В настоящее время наиболее распространенными конструкциями чувствительных элементов являются конструкции двух типов — пьезоэлектрические и емкостные. Главным недостатком пьезоэлектрического датчика является ограниченность снизу его частотного диапазона, т. е. подобный датчик не способен измерять ускорения ниже некоторой граничной частоты, вплоть до статических ускорений. По этой причине одним из наиболее перспективных решений в данной области является емкостной МЭМС-акселерометр.

Другой, не менее важной частью является схема обработки сигнала, от корректного функционирования которой напрямую зависят выходные параметры готового изделия.

Анализ существующих схем обработки

На первом этапе маршрута были проанализированы существующие схемы обработки, информация о которых представлена в открытых источниках (патенты на отечественные и зарубежные решения). Было установлено, что при измерении малых емкостей никак не компенсируются паразитные емкости, образованные элементами корпуса и соединительными проводниками. Кроме того, схемы, работающие на основе компенсационного принципа, реализуют лишь пропорциональную обратную связь, которая имеет своим главным недостатком невозможность полного устранения ошибки рассогласования в контуре обратной связи. Указанные обстоятельства приводят к существенному снижению точности измеряемой вибрации и требуют отдельной проработки.

Предлагаемое решение заключается в том, что в качестве усилителя сигнала чувствительного элемента (ЧЭ) выступает зарядовый усилитель, а контур обратной связи настроен таким образом, чтобы иметь возможность работать как в устойчивом, так и в условно-устойчивом режимах. Выбор режима работы осуществляется посредством изменения частоты генератора накачки и коэффициента усиления зарядового усилителя. В устойчивом режиме работы зарядовый усилитель имеет меньший коэффициент усиления, а генератор переменного тока обладает более низкой частотой. В условно-устойчивом режиме зарядовый усилитель имеет больший коэффициент усиления, а генератор переменного тока обладает более высокой частотой. В случае работы схемы обработки в устойчивом режиме ошибка рассогласования будет полностью устранена и, соответственно, значительно снижен уровень шумов в выходном сигнале. В случае ра-

боты в условно-устойчивом режиме ошибка рассогласования также будет значительно снижена по сравнению с аналогами. Но во втором случае дополнительно к снижению уровня шумов полностью устраняется влияние ЧЭ на нелинейность передаточной характеристики и частотный диапазон преобразования. Это достигается посредством работы схемы обработки МЭМС-акселерометра в условно-устойчивом режиме, когда она находится на грани возбуждения, и поэтому выходные параметры компенсационного акселерометра определяются исключительно параметрами электронной системы. Это позволяет также исключить влияние ЧЭ на температурную и временную нестабильность смещения нулевого сигнала. Все это приводит к повышению точности измерения МЭМС-акселерометра. На данное решение получена заявка на изобретение.

Разработка твердотельной модели ЧЭ

На втором этапе была разработана твердотельная модель ЧЭ [4] (рис. 1, см. третью сторону обложки), полностью соответствующая всем требованиям с точки зрения технологического процесса. Следует отметить, что на данном этапе возникает необходимость согласования с технологами проектных норм и применяемых материалов. В случае расхождений целесообразно выполнить расчет конструкции заново в целях учета требований технологического процесса и, одновременно с этим, выполнения общего ТЗ на изделие.

Подготовка твердотельной модели

На третьем этапе была выполнена подготовка твердотельной модели к последующему анализу. В целях снижения ресурсоемкости были исключены конструктивные элементы, не имеющие прямого отношения к ее функционированию в указанных условиях.

Вычисление деформации в конструкции

На четвертом этапе вычислялись деформации в конструкции в предполагаемых условиях работы в целях определения значений электрических емкостей, образованных ротором и статором (рис. 2, см. третью сторону обложки).

Далее следует установить связь между зазором, образующимся между ротором и статором под действием известного ускорения, и координатой. Аппроксимируем зависимость значения зазора от координаты с помощью полинома 3-й степени:

$$d = p_1 x^3 + p_2 x^2 + p_3 x + p_4, \quad (1)$$

где p_1, p_2, p_3, p_4 — коэффициенты полинома; d — зазор, мкм; x — координата, мм.

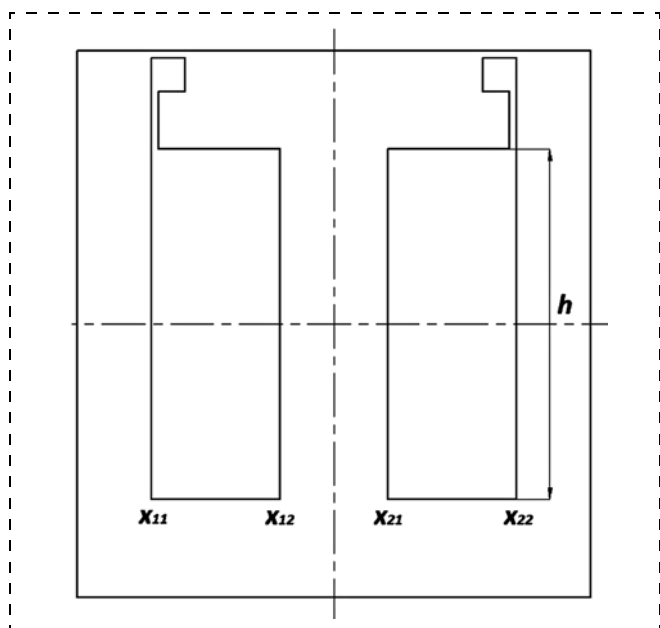


Рис. 3. Геометрические размеры статора ЧЭ
Fig. 3. Geometrical sizes of SE stator

Поскольку электрические емкости образуются между статором (рис. 3) и ротором в тех местах, где находятся обкладки с известными координатами, то, соответственно, образующуюся емкость следует рассчитывать на том участке ротора и статора, где они находятся.

Теперь рассчитаем электрическую емкость, образованную обкладками:

$$C_1 = \frac{S\epsilon\epsilon_0}{d} = h\epsilon_0 \int_{x_{11}}^{x_{12}} \frac{1}{p_1 x^5 + p_2 x^4 + p_3 x^3 + p_4 x^2 + p_5 x + p_6} ; \quad (2)$$

$$C_2 = \frac{S\epsilon\epsilon_0}{d} =$$

$$= h\epsilon_0 \int_{x_{21}}^{x_{22}} \frac{1}{p_1 x^5 + p_2 x^4 + p_3 x^3 + p_4 x^2 + p_5 x + p_6} , \quad (3)$$

где C_1 — электрическая емкость 1-й обкладки; C_2 — электрическая емкость 2-й обкладки.

В нашем случае

$$x_{11} = 1,1 \text{ мм}, \quad x_{12} = 3 \text{ мм}, \quad x_{21} = 4,6 \text{ мм}, \\ x_{22} = 6,5 \text{ мм}, \quad h = 5,2 \text{ мм}.$$

Соответственно, для указанных геометрических размеров статическая характеристика может быть описана в табличном виде (табл. 1).

Поскольку измерение одной из емкостей C_1 или C_2 (напрямую) приводит к появлению большой нелинейности [7], то электронная система МЭМС-акселерометра выполняет преобразование вида "емкость—напряжение" не напрямую, а согласно выражению

$$U_{\text{вых}} = K \frac{C_2 - C_1}{C_2 + C_1} U_{\text{REF}} + U_0, \quad (4)$$

где K — масштабный коэффициент МЭМС-акселерометра, В/г; U_0 — смещение нуля МЭМС-акселерометра, В; U_{REF} — опорное напряжение МЭМС-акселерометра (в данной работе $U_{\text{REF}} = +1,25 \text{ В}$).

В данной работе масштабный коэффициент МЭМС-акселерометра (для предложенной электронной системы) составил 18 В/г (такое большое значение необходимо для обеспечения возможности измерения вибрации амплитудой 100 mg).

Таблица 1
Table 1

Статическая характеристика преобразования ЧЭ МЭМС-акселерометра
"ускорение — перемещение инерционной массы" и "ускорение — электрическая емкость"
Static characteristic of transformation of SE of MEMS accelerometer
"acceleration — transfer of the inertial mass" and "acceleration — electric capacity"

Ускорение Acceleration, g	Перемещение инерционной массы, мкм Transfer of the inertial mass, μm	Электрическая емкость C_1 , пФ Electric capacity C_1 , pF	Электрическая емкость C_2 , пФ Electric capacity C_2 , pF	$\frac{C_1 - C_2}{C_1 + C_2} \cdot U_{\text{REF}}, \text{ В}$
0	0	7,95	7,95	0
0,1	0,03	7,942	7,968	0,0020
0,2	0,06	7,935	7,986	0,0040
0,3	0,09	7,928	8,005	0,0059
0,4	0,12	7,921	8,025	0,0080
0,5	0,15	7,915	8,044	0,0101
0,6	0,18	7,908	8,063	0,0121
0,7	0,21	7,901	8,081	0,0140
0,8	0,24	7,894	8,102	0,0162
0,9	0,27	7,888	8,120	0,0181
1	0,30	7,881	8,141	0,0203

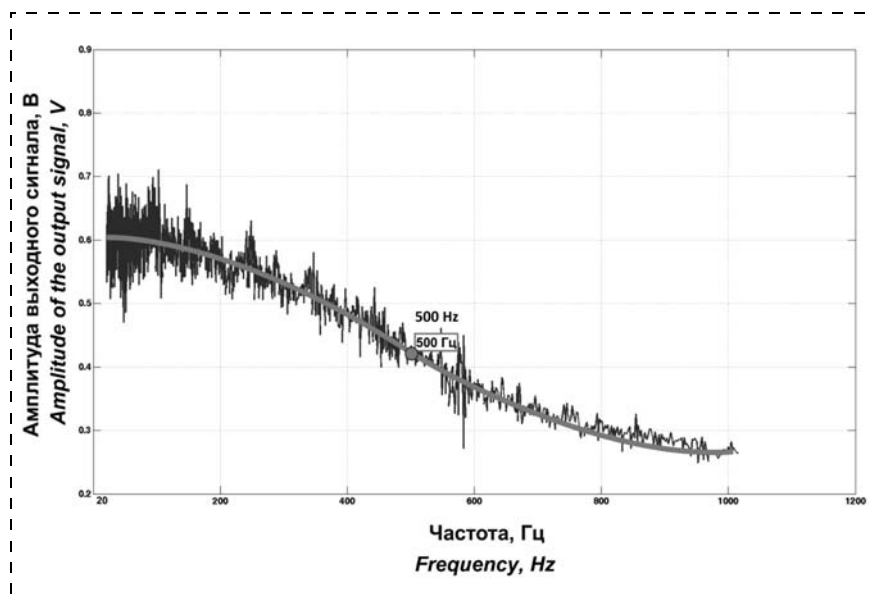


Рис. 4. АЧХ МЭМС-акселерометра (измерения проводились при амплитуде вибрации 100 mg)

Fig. 4. Amplitude-frequency characteristic of MEMS accelerometer (measurements were done at the amplitude of vibration of 100 mg)

На пятом этапе выполняется динамический анализ конструкции, в данной работе — модальный анализ. Для обеспечения стабильной работы ЧЭ в составе устройства необходимо определить его собственную частоту для оценки возможности функционирования в условиях вибрации высокой интенсивности, частота которой определяется областью применения. В результате проведения моделирования установлена собственная частота, представленная формой колебаний № 1 (табл. 2, см. четвертую сторону обложки), так как данная форма колебаний совпадает с направлением измерительной оси.

Полученное значение собственной частоты значительно превышает верхнюю граничную частоту вибрации, характерную для выбранной области применения, что позволяет сделать вывод о том, что данная конструкция обладает необходимой прочностью к указанному выше воздействию.

На шестом этапе изготавливается макетный образец и выполняются испытания, имеющие своей целью подтвердить выполнение требований ТЗ или сформулировать рекомендации по корректировке конструкции. В нашем случае были проведены испытания опытного образца на вибростенде и построена АЧХ (рис. 4).

Заключение

Предложенный маршрут охватывает все необходимые этапы разработки конструкции чувствительного элемента, включая изготовление и проведение необходимых исследований. Было показано,

что на протяжении маршрута возможны корректировки, имеющие своей целью обеспечить работоспособность изделия в выбранной области и, следовательно, оптимизировать существующую конструкцию в соответствии с требуемыми функциональными параметрами [8, 9].

Работа выполнялась при финансовой поддержке Российского научного фонда при выполнении проекта 16-19-00177 "Исследование и разработка интеллектуальных МЭМС датчиков с функциями самокалибровки и автоматизированных испытательных комплексов".

Список литературы

1. **Нанотехнологии** в электронике / Под ред. Ю. А. Чаплыгина. Вып. 2. М.: Техносфера, 2013. 688 с.
2. **Timoshenkov S., Shalimov A., Korobova N., Kalugin V., Kosolapov A.** Micro-electromechanical accelerometer of pendulum type for measuring vibration of rotary aggregates in the oil and gas industry // 16 Intern. Scientific Conf. SGEM-2016. 2016. Book 6. Vol. 1. P. 143–150.
3. **Шалимов А. С., Тимошенко С. П., Коробова Н. Е., Калугин В. В., Тимошенко А. С., Анчутин С. А., Головинский М. С., Кунецова Л. И., Косолапов А. А., Шепелев С. О.** Особенности емкостных акселерометров маятникового типа // Межд. форум "Микроэлектроника — 2016", 2-я научная конф. "Интегральные схемы и микроэлектронные модули", 2016. С. 446–450.
4. **Shalimov A., Timoshenkov S., Korobova N., Golovinskiy M., Timoshenkov A., Zuev E., Berezueva S., Kosolapov A.** Comb structure analysis of the capacitive sensitive element in MEMS — accelerometer // Micro- and Nanotechnology Sensors, Systems, and Applications VII Conference (SPIE.DSS). 2015. Vol. 9467. P. 82.
5. **Тимошенко С. П., Шалимов А. С., Кочурина Е. С., Naing S. M., Bushnak A. R.** Исследование статических характеристик емкостного преобразователя линейного ускорения на базе микросхемы отечественного производства // Известия высших учебных заведений. Электроника. 2012. № 4 (96). С. 90–92.
6. **Timoshenkov S., Kalugin V., Shalimov A., Timoshenkov A., Golovinskiy M., Berezueva S.** Measurement of capacitive accelerometer with decreased nonlinearity of static characteristic // International Conference on Intelligent Materials and Manufacturing Engineering (IMME2015). 2015. 43 p.
7. **Timoshenkov S. P., Timoshenkov A. S., Shalimov A. S., Korobova N. E.** Development and Study of Electronic Converter Adaptive Linear Acceleration with Custom Output Characteristics // HKICEAS. 2012. P. 1–4.
8. **Kochurina E., Timoshenkov S., Korobova N., Chaplygin Y., Anchutin S., Kosolapov A.** Research and development of capacitive transducer with linear acceleration // Proceedings SPIE Microtechnologies. 4–6. Barcelona, 2015. 86 p.

S. P. Timoshenkov, D. Sc., Professor, spt@miee.ru,
A. S. Shalimov, Ph. D., Science Researcher, Assistant Professor, 85e@mail.ru,
M. S. Golovinsky, Engineer, maxim1112010@mail.ru,
V. V. Kalugin, D. Sc., Professor, viktor118@mail.ru,
N. E. Korobova, D. Sc., Professor, of Microelectronics Dept., korobova3@mail.ru,
A. S. Timoshenkov, Ph. D., Science Researcher, Assistant Professor, porcuapa@gmail.com,
S. A. Anchutin, Lead Engineer, step305@mail.ru
National Research University of Electronic Technology (MIET), Moscow, 124498, Russian Federation

Corresponding author:

Shalimov Andrey S., Ph. D., Science Researcher, Assistant Professor, 85e@mail.ru, National Research University of Electronic Technology (MIET), Moscow, 124498, Russian Federation

Design Route of the MEMS Accelerometer Optimized by the Functional Parameters Aimed to Ensure a Self-Calibration

Received on June 10, 2017

Accepted on July 21, 2017

A design route for the capacitive sensor of MEMS accelerometer is proposed, making possible to achieve the optimal value of one or several functional parameters of a finished product, which is of great importance for solving of the problem of the sensors' self-calibration. An example is provided of realization of a route for development of a sensor intended for measurement of small vibrations.

Keywords: *capacitive accelerometer, self-calibration sensor, MEMS accelerometer, capacitance-to-voltage converter, comb structure*

For citation:

Timoshenkov S. P., Shalimov A. S., Golovinsky M. S., Kalugin V. V., Korobova N. E., Timoshenkov A. S., Anchutin S. A. Design Route of the MEMS Accelerometer Optimized by the Functional Parameters Aimed to Ensure a Self-Calibration, *Nano- i Mikrosistemnaya Tekhnika*, 2017, vol. 19, no. 12, pp. 707—713.

DOI: 10.17587/nmst.19.707-713

Introduction

MEMS accelerometer can be described by means of a set of functional parameters, at that, some of them are mutually exclusive by their numerical values. This causes a necessity for a compromise in selection of the parameters, which can be reached only during consideration of a concrete sphere of application of the accelerometer and, hence, during solving of a task set for it. The range of the tasks for such sensors is rather wide. Since the data, concerning the theoretical foundations and practical examples differ considerably, the route of designing for one and the same problem can vary strongly, depending on the real technological process, properties of the applied materials and operating modes of the equipment. Therefore, development of a universal route of designing, allowing us to optimize the MEMS accelerometer by one or several functional parameters, is, no doubt, important [1], especially during realization of the function of self-calibration.

In the given work an attempt is done to realize a route and to apply it for development of a MEMS ac-

celerometer for measurement of small vibrations with the amplitude of about 100 mg and implementation of the function of a threshold device.

The accelerometers for measurement of vibrations [2, 3] find their application in the security alarm systems, aimed to detect small vibrations in the protected territory, which correspond to human steps, and to ensure actuation of an alarm system.

The key element of a MEMS accelerometer is its sensitive element (SE). The most wide-spread designs of the sensitive elements are the designs of two types — piezoelectric and capacitor ones. The main drawback of the piezoelectric sensor is its frequency range limited from below, i.e. such a sensor cannot measure acceleration below a certain boundary frequency, up to the static accelerations. For this reason one of the most promising solutions in the given area is the capacitor MEMS accelerometer.

Another, not less important thing, is the signal processing circuit, on the correct functioning of which depend directly the output parameters of a finished product.

Analysis of the existing processing circuits

At the first stage of the route processing the circuits were analyzed, the information about which was presented in the open sources (patents for domestic and foreign solutions). It was established, that during measurement of small capacities the parasitic capacities formed by the elements of the case and the connecting conductors were not compensated for in any way. Besides, the circuits based on the compensatory principle realize only the proportional feedback, the main drawback of which is impossibility of a complete elimination of a mismatch error in the feedback loop. The above circumstances decrease the accuracy of the measured vibrations and require a separate study.

The proposed solution boils down to the fact that the role of the amplifier of SE signal is played by the charging amplifier, while the feedback loop is adjusted so that it can operate in both steady and in conditionally stable modes. The selection of the operating mode is carried out by variation of the frequency of the pump oscillator and coefficient of amplification of the charging amplifier. In a stable operating mode the charging amplifier has a smaller coefficient of amplification, while the alternating current generator has a lower frequency. In a conditionally stable mode the charging amplifier has a bigger coefficient of amplification, and the alternating current generator has a higher frequency. In case of operation of the processing circuit in a steady mode the mismatch error will be eliminated completely and, accordingly, the level of noise in the output signal will be considerably lower. In case of operation in the conditionally stable mode the mismatch error will be considerably less than in the analogues. But in the second case, also, in addition to lower noises, the influence of SE on the nonlinearity of the transfer characteristic and the frequency range of transformation is eliminated completely. This is achieved due to operation of the processing circuit of MEMS accelerometer in the conditionally stable mode, when it is on the edge of excitation and, consequently, the output parameters of the compensatory accelerometer are determined exclusively by the parameters of the electronic system. This also allows us to exclude the influence of SE on the temperature and time instability of displacement of the zero signal. All this leads to an increase of the accuracy of measurement of the MEMS accelerometer. An invention application was received for this solution.

Development of a solid-state model of SE

At the second stage a solid-state model of SE was developed [4] (Fig. 1, see the 3-rd side of cover), com-

pletely corresponding to the requirements from the point of view of the technological process. We should point out that at the given stage there is a necessity for coordination of the design norms and the applied materials with the technologists. In case of divergences, it would be expedient to calculate the design anew in order to take into account the requirements of the technological process and, simultaneously, the general requirements specification concerning a product.

Preparation of a solid-state model

At the third stage a preparation of the solid-state model for an analysis was done. For the resource-saving purpose the constructive elements, which did not have a direct relation to its functioning in the specified conditions, were excluded.

Calculation of a deformation in the design

At the fourth stage the deformations were calculated in the design in the expected working conditions with a view to determine the values of the electric capacities formed by the rotor and the stator (Fig. 2, see the 3-rd side of cover).

Then it is necessary to establish a connection between the gap formed between the rotor and the stator under the influence of the known acceleration, and the coordinate. We will approximate the dependence of the value of the gap on the coordinate by means of a polynomial of the 3rd degree:

$$d = p_1x^3 + p_2x^2 + p_3x + p_4, \quad (1)$$

where p_1, p_2, p_3, p_4 — coefficients of the polynomial, d — gap, μm , x — the coordinate, mm .

Since the electric capacities are formed between the stator (Fig. 3) and the rotor in those places, where there are coverings with the known coordinates, the formed capacity should be calculated on the site of the rotor and the stator, where they are.

Now we will calculate the electric capacity formed by the coverings:

$$C_1 = \frac{S\varepsilon\varepsilon_0}{d} = h\varepsilon_0 \int_{x_{11}}^{x_{12}} \frac{1}{p_1x^5 + p_2x^4 + p_3x^3 + p_4x^2 + p_5x + p_6} dx; \quad (2)$$

$$C_2 = \frac{S\varepsilon\varepsilon_0}{d} = h\varepsilon_0 \int_{x_{21}}^{x_{22}} \frac{1}{p_1x^5 + p_2x^4 + p_3x^3 + p_4x^2 + p_5x + p_6} dx, \quad (3)$$

where C_1 — electric capacity of the 1st covering; C_2 — electric capacity of the 2nd covering.

In our case $x_{11} = 1.1$ mm, $x_{12} = 3$ mm,

$x_{21} = 4.6$ mm, $x_{22} = 6.5$ mm, $h = 5.2$ mm.

Accordingly, for the specified geometrical sizes the static characteristic can be described in a tabular form.

Since measurement of one of the capacities of C_1 or C_2 (directly) leads to occurrence of a big nonlinearity [7], the electronic system of MEMS accelerometer carries out transformation of the "capacity-voltage" form not directly, but in accordance with the following expression:

$$U_{\text{ВЫХ}} = K \frac{C_2 - C_1}{C_2 + C_1} U_{\text{REF}} + U_0, \quad (4)$$

where K — scale coefficient of MEMS accelerometer, V/g; U_0 — displacement of zero of MEMS accelerometer, V; U_{REF} — reference voltage of MEMS accelerometer (in the given work $U_{\text{REF}} = +1.25$ V).

In the work the scale coefficient of MEMS accelerometer (for the proposed electronic system) was 18 V/g (such a big value is necessary to ensure a possibility of measurement of vibrations with amplitude of 100 mg).

At the fifth stage a dynamic analysis of the design, in the given work — a modal analysis, is done. In order to ensure a stable operation of SE in the composition of the device it is necessary to determine its own frequency for estimation of a possibility of functioning in the conditions of a high intensity vibration, the frequency of which is determined by the sphere of application. As a result of carrying out of modeling the own frequency was established presented by the form of oscillations № 1 (table 2, see the 4-th side of cover), because the given form of oscillations coincides with the direction of the measuring axis.

The obtained value of the own frequency exceeds the upper limit of the vibration frequency, typical for the selected sphere of application, which allows us to draw a conclusion that the design has the necessary strength to withstand the above influence.

At the sixth stage a model sample is made and its tests are carried out with the aim to check that it meets the requirements specification or to formulate recommendations concerning corrections in the design. In our case a pre-production model was tested on a vibration table and an amplitude-frequency characteristic was constructed (fig. 4).

Conclusion

The proposed route covers all the necessary cycles of development of the design of a sensitive element, including manufacturing and the necessary research works. It was demonstrated, that throughout the whole of the route corrections were possible, aimed to ensure functionality of a product in the selected area and to optimize the existing design in accordance with the required functional parameters [8, 9].

The work was done with the financial support of the Russian Scientific Foundation within the framework of project 16-19-00177 "Research and development of intellectual MEMS sensors with self-calibration functions and automated test complexes".

References

1. *Nanotechnology in Electronics*. Ed. Y. A. Chaplygin, Moscow, Technosphere, 2013, 668 p. (in Russian).
2. **Timoshenkov S., Shalimov A., Korobova N., Kalugin V., Kosolapov A.** Micro-electromechanical accelerometer of pendulum type for measuring vibration of rotary aggregates in the oil and gas industry, *16 Intern. Scientific Conf. SGEM-2016*, 2016, book 6, vol. 1, pp. 143–150.
3. **Shalimov A. S., Timoshenkov S. P., Korobova N. E., Kalugin V. V., Timoshenkov A. S., Anchutin S. A., Golovinsky M. S., Kunetsova L. I., Kosolapov A. A., Shepelev S. O.** Features of capacitive accelerometers of pendulum type. Int. Forum "Microelectronics — 2016", 2-nd scientific conference. Integral circuits and microelectronic modules. pp. 446–450 (in Russian).
4. **Shalimov A., Timoshenkov S., Korobova N., Golovinskiy M., Timoshenkov A., Zuev E., Berezueva S., Kosolapov A.** Comb structure analysis of the capacitive sensitive element in MEMS — accelerometer, *Micro- and Nanotechnology Sensors, Systems, and Applications VII Conference (SPIE.DSS)*, 2015, vol. 9467, p. 82.
5. **Timoshenkov S. P., Shalimov A. S., Kochurina E. S., Naing S. M., Bushnak A. R.** Issledovanie staticheskikh harakteristik emkostnogo preobrazovatelja linejnogo uskoreniya na baze mikroschemy otechestvennogo proizvodstva. *Izvestiya vuzov. Electronics*, 2012, no. 4 (96), pp. 90–92 (in Russian).
6. **Timoshenkov S., Kalugin V., Shalimov A., Timoshenkov A., Golovinskiy M., Berezueva S.** Measurement of capacitive accelerometer with decreased nonlinearity of static characteristic. *International Conference on Intelligent Materials and Manufacturing Engineering (IMME 2015)*, 2015, p. 43.
7. **Timoshenkov S. P., Timoshenkov A. S., Shalimov A. S., Korobova N. E.** Development and Study of Electronic Converter Adaptive Linear Acceleration with Custom Output Characteristics, *HKICEAS*, 2012, pp. 1–4.
8. **Kochurina E., Timoshenkov S., Korobova N., Chaplygin Y., Anchutin S., Kosolapov A.** Research and development of capacitive transducer with linear acceleration, *Proceedings SPIE Microtechnologies — 2015*, 4–6 Barcelona, 9517, 951725, p. 86.

И. И. Абрамов, д-р физ.-мат. наук, проф., **Н. В. Коломейцева**, науч. сотр., **В. А. Лабунов**, д-р техн. наук, академик НАНБ, академик РАН, проф., зав. лаб., **И. А. Романова**, науч. сотр.
Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники,
Минск, Республика Беларусь
E-mail: nanodev@bsuir.edu.by

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПОЛЕВЫХ ГРАФЕНОВЫХ ТРАНЗИСТОРОВ С ОДНИМ И ДВУМЯ ЗАТВОРАМИ

Поступила в редакцию 19.06.2017

С использованием разработанных комбинированных моделей проведено моделирование одно- и двухзатворных полевых транзисторов на однослойном графене. Исследовано влияние различных факторов на вольт-амперные характеристики приборов. Получено хорошее согласование результатов расчетов с экспериментальными данными.

Ключевые слова: полевой транзистор, однослойный графен, вольт-амперная характеристика, комбинированная модель, моделирование

Введение

Большое внимание в настоящее время в высокочастотной наноэлектронике уделяется созданию приборных структур на основе углеродных наноматериалов [1]. Перспективной, в частности, считается разработка полевых графеновых транзисторов (ПГТ) [2]. В связи с этим проводятся интенсивные исследования по созданию моделей таких приборных структур, без которых их разработка и оптимизация будут просто невозможны. Проведенный анализ показывает, что в моделях ПГТ важно учитывать следующие факторы: подвижности электронов и дырок; квантовую емкость; сопротивление стока и истока.

Целью работы является моделирование с учетом отмеченных факторов вольт-амперных характеристик ПГТ с одним и двумя затворами на основе однослойного графена с использованием предложенных комбинированных моделей.

Модели

Нами уже отмечалось [3], что для описания транспорта в графене необходимо применять в качестве исходных уравнения квантовой электродинамики. Однако в рассматриваемых в работе случаях однослойного графена на подложках различного типа допустимо использовать уравнения нерелятивистской квантовой механики и следующих из них более простых квантовых моделей [4]. Анализ показывает, что в качестве исходных достаточно использовать для ПГТ с характерными на настоящий момент времени размерами уравнения квантовой диффузионно-дрейфовой модели [4].

Рассмотрим предложенные комбинированные модели ПГТ.

В качестве модели 1 использовали упрощенную комбинированную модель двухзатворного ПГТ (согласно классификации [4–6]), сочетающую элементы физико-топологической и электрической моделей.

На первом этапе в модели 1 рассчитываем квантовую емкость по упрощенной формуле [7]

$$C_q = \frac{2q^3}{\pi(\hbar V_F)^2}, \quad (1)$$

где q — заряд электрона; $\hbar$ — постоянная Планка, деленная на 2π ; скорость Ферми $V_F = 10^6$ м/с.

Затем вычисляем емкости затворов (для двухзатворного ПГТ) или емкость затвора (для однозатворного ПГТ) согласно соотношению

$$C_g = \frac{C_q C_{in}}{C_q + C_{in}}, \quad (2)$$

где C_{in} — емкость, сформированная между затвором и слоем графена.

Далее рассчитываем электростатический потенциал канала согласно соотношению [8, 9]:

$$V = \frac{C_{gt}(V_{tg} - V_{tg0} - V(x)) + C_{gb}(V_{beff} - V(x))}{C_{gt} + C_{gb} + \alpha C_q}, \quad (3)$$

где C_{gt} , C_{gb} — емкости верхнего, нижнего затворов; V_{tg} — напряжение на верхнем затворе; V_{beff} — эффективное напряжение на нижнем затворе; V_{tg0} — напряжение Дирака для верхнего затвора; $V(x)$ — электростатический потенциал канала при нулевом смещении для $V(x=0) = 0$ и $V(x=L) = V_{ch}$, V_{ch} — полное падение напряжения в канале; коэффициент емкости $\alpha = 0,5$ при $q|V| \gg kT$, k — постоянная Больцмана; T — температура окружающей среды.

Выражение (3) применимо для двухзатворных ПГТ. В случае однозатворного ПГТ оно преобразуется к виду:

$$V = \frac{C_g(V_g - V_{g0} - V(x))}{C_g + \alpha C_q}, \quad (4)$$

где V_g — напряжение на затворе; V_{g0} — напряжение Дирака для затвора.

Квантовые явления могут быть учтены с помощью эффективной подвижности носителей заряда μ , учитывающей подвижности электронов и дырок, общей плотности заряда листа графена Q и квантовой емкости C_q . На втором этапе на основе найденного электростатического потенциала в канале рассчитываются эффективная подвижность носителей заряда в графене μ согласно модели (10) из работы [10], учитывающая подвижности электронов и дырок, а также общая плотность заряда листа графена Q согласно [11]:

$$Q = \frac{q\pi(kT)^2}{3(\hbar V_F)^2} + \frac{q^3 V^2}{\pi(\hbar V_F)^2} + q\left(\frac{\Delta^2}{\pi\hbar^2 V_F^2}\right), \quad (5)$$

где Δ — неоднородность электростатического потенциала.

Далее для нахождения тока стока используется формула, полученная из квантовой диффузионно-дрейфовой модели, а именно [8, 9]:

$$I_d = \frac{W \int_0^{V_{ch}} \mu Q dV}{L + \left| \int_0^{V_{ch}} \frac{\mu}{V_{sat}} dV \right|}, \quad (6)$$

где W — ширина канала; L — длина канала; V_{sat} — скорость насыщения. Скорость насыщения рассчитывается на основе соотношения (11) работы [10].

Заметим, что если не учитывать квантовые явления и падения напряжений на областях стока и истока, то в этом случае $V_{ch} = V_d$ (V_d — напряжение, прикладываемое к стоку относительно истока), а соотношение (6) приводит к традиционной диффузионно-дрейфовой модели, используемой многими авторами (иногда с модификациями и коррекциями) при расчете тока стока ПГТ.

На завершающем этапе после нахождения I_d перерасчитываем напряжение V_d с учетом падений напряжений на сопротивлениях стока R_d и истока R_s , т. е. $V_d = V_{ch} + (R_d + R_s)I_d$. Заметим, что в общем случае $R_d \neq R_s$ и не равны 0.

Рассмотрим модель 2 ПГТ.

На первом этапе, так же как и в модели 1, рассчитываем квантовую емкость по упрощенной

формуле (1) и емкости затворов согласно соотношению (2).

Далее в отличие от модели 1 с помощью итерационного метода самосогласованно рассчитываем электростатический потенциал канала по формуле (3) (с учетом коэффициента емкости α) и квантовую емкость согласно соотношению [7]:

$$C_q = \frac{2q^3}{\pi(\hbar V_F)^2} |V|. \quad (7)$$

В соотношении (3) используется формула (14) из работы [10] для α , в которой учитывается его изменение в зависимости от электростатического потенциала в канале V . Перерасчет величин осуществляется самосогласованно до тех пор, пока поправка электростатического потенциала в канале не достигнет заданного значения. В случае однозатворного ПГТ используется соотношение (4).

Далее эффективную подвижность μ , общую плотность заряда листа графена Q вычисляем так же как в модели 1. Скорость насыщения рассчитываем с учетом рассеяния на оптических фононах на основе модели [12]:

$$V_{sat} = \begin{cases} \frac{2V_F}{\pi}, & \text{если } |Q_{net}| \leq q|\rho_{crit}| \\ \frac{2q\Omega}{\pi^2 \hbar V_F |Q_{net}|} \sqrt{\frac{\pi(\hbar V_F)^2 |Q_{net}|}{q} - \left(\frac{\hbar\Omega}{2}\right)^2}, & \text{если } |Q_{net}| > q|\rho_{crit}|; \end{cases} \quad (8)$$

$$\rho_{crit} = \frac{1}{2\pi} \left(\frac{\Omega}{V_F} \right), \quad (9)$$

где ρ_{crit} — критическая плотность носителей заряда; Q_{net} — плотность заряда носителей в канале ($Q_{net} = |\alpha C_q V|$); $\hbar\Omega$ — эффективная энергия оптических фононов.

Ток стока вычисляем согласно (6). Завершающий этап расчетов совпадает с таковым для модели 1. Модель 2 более адекватная по сравнению с моделью 1 и позволяет получить хорошее согласование с экспериментальными данными, так как электростатический потенциал в канале и квантовая емкость рассчитываются самосогласованно. Как правило, параметрами модели при согласовании расчетов с экспериментом являются сопротивления стока R_d и истока R_s , а также $\hbar$ в эффективной подвижности носителей заряда [10].

Разработанные программы, реализующие описанные модели, включены в систему моделирования нанoeлектронных устройств NANODEV [13–15], разрабатываемую в БГУИР с 1995 г. и предназначенную для ПЭВМ.

Результаты моделирования

С применением разработанных комбинированных моделей 1 и 2 проводили расчет выходных характеристик одно- и двухзатворных ПГТ на однослойном графене. Расчеты осуществляли при температуре $T = 300$ К, если не указано другое. На графиках приведены результаты для тока стока или плотности тока стока для удобства сравнения с результатами других моделей либо с экспериментальными данными.

На рис. 1 показано поперечное сечение двухзатворного ПГТ на основе однослойного графена. В случае однозатворного ПГТ верхний затвор отсутствует. Нижний затвор двухзатворного ПГТ отделен от канала толстым диэлектриком. Он необходим для управления положением точки электро-нейтральности и типом проводимости.

Основными исходными данными для расчета являются: длина и ширина канала, толщины слоев диэлектриков для верхнего и нижнего затворов, либо в случае однозатворного ПГТ — толщина диэлектрика одного затвора; подвижности электронов и дырок в графене, диэлектрические проницаемости подзатворного диэлектрика для верхнего и нижнего затворов, скорость Ферми в монослое графена, неоднородность электростатического потенциала, энергия оптических фононов, зависящая от подзатворного диэлектрика; прикладываемые к прибору напряжения, температура окружающей среды; сопротивления стока и истока; напряжения Дирака для верхнего и нижнего затворов.

Рассмотрим результаты расчетов, полученные с помощью модели 1. На рис. 2 показаны выходные характеристики ПГТ 1 при различных сопротивлениях стока R_d и истока R_s . ПГТ 1 располагается на

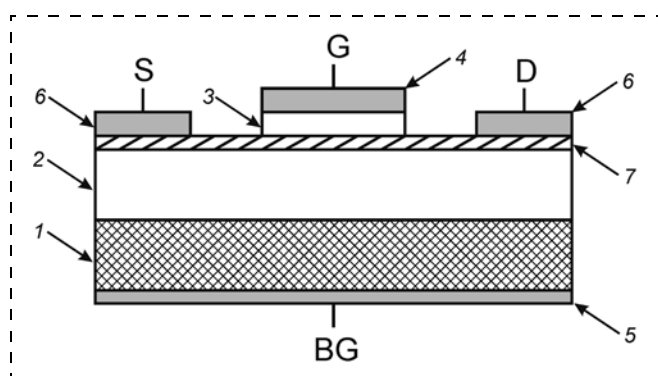


Рис. 1. Поперечное сечение двухзатворного ПГТ на основе однослойного графена: S — исток; G — верхний затвор; BG — нижний затвор; D — сток; 1 — подложка; 2 — диэлектрик нижнего затвора; 3 — диэлектрик верхнего затвора; 4 — металл верхнего затвора; 5 — металл нижнего затвора; 6 — металл истока и стока; 7 — графен

Fig. 1. Cross-section of dual-gate GFET based on monolayer graphene: S — source; G — top gate; BG — back gate; D — drain; 1 — substrate; 2 — back-gate dielectric; 3 — top-gate dielectric; 4 — top-gate metal; 5 — back-gate metal; 6 — source and drain metal; 7 — graphene

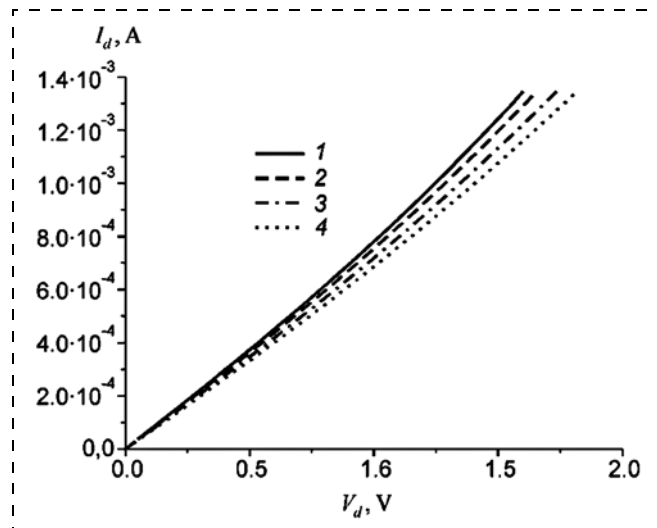


Рис. 2. Выходные характеристики двухзатворного ПГТ 1 с длиной канала 5 мкм при различных сопротивлениях истока и стока, рассчитанные по модели 1: 1 — $R_d = R_s = 0$ Ом; 2 — $R_s = 10$ Ом; $R_d = 30$ Ом; 3 — $R_s = 10$ Ом; $R_d = 90$ Ом; 4 — $R_s = 10$ Ом; $R_d = 150$ Ом

Fig. 2. Output characteristics of 5-μm dual-gate GFET 1 for various source and drain resistances calculated with the use of the model 1: 1 — $R_d = R_s = 0$ Ω; 2 — $R_s = 10$ Ω; $R_d = 30$ Ω; 3 — $R_s = 10$ Ω; $R_d = 90$ Ω; 4 — $R_s = 10$ Ω; $R_d = 150$ Ω

подложке SiO_2/Si и имеет два затвора. Тонкий слой Al_2O_3 является диэлектриком верхнего затвора. Длина канала $L = 5$ мкм, а другие параметры ПГТ 1 приведены в работе [16]. Характеристики рассчитаны с учетом не только электронной, но и дырочной проводимости. Отметим, что результаты моделирования для случая $R_d \neq R_s$ качественно правильно отражают известные экспериментальные данные [16], т. е. с ростом R_d ток стока снижается.

Далее приводим результаты расчетов, полученные только с помощью модели 2.

На рис. 3 показаны выходные характеристики однозатворного ПГТ 2 с длиной канала $L = 3$ мкм, полученные в работе [17], при различных значениях толщины диэлектрика. Роль диэлектрика затвора выполняет гексагональный нитрид бора (h-BN). Расчеты выполнены для случая $V_{gs} = -2$ В, эффективная энергия оптических фононов $\hbar\Omega = 200$ мэВ. Кривая 1 соответствует значению толщины h-BN 8,5 нм, кривая 2 — 9,5 нм, кривая 3 — 10,5 нм. Было установлено, что увеличение толщины диэлектрика приводит к уменьшению тока стока. Отметим хорошее согласование результатов моделирования с использованием параметров $h = 0,178$ м²/(В · с), $R_d = R_s = 200$ Ом (кривая 1) с экспериментальными данными (кривая 4) работы [17].

На рис. 4 показаны выходные характеристики ПГТ 2 при различной длине канала. Расчеты выполнены для случая $V_{gs} = -1,5$ В. Кривая 1 соответствует длине канала 3 мкм, кривая 2 — 6 мкм, кривая 3 — 9 мкм. Видно, что с увеличением дли-

ны канала существенно снижается ток стока, что согласуется с известными данными для ПГТ. Получено также хорошее согласование результатов моделирования с использованием параметров $h = 0,24 \text{ м}^2/(\text{В} \cdot \text{с})$, $R_d = R_s = 200 \text{ Ом}$ (кривая 1) с экспериментальными данными (кривая 4) работы [17].

С помощью модели 2 были проведены расчеты выходных характеристик двухзатворного ПГТ 1 при различных температурах окружающей среды (рис. 5). В расчетах использована эффективная энергия оптических фононов $\hbar\Omega = 55 \text{ мэВ}$. Как и

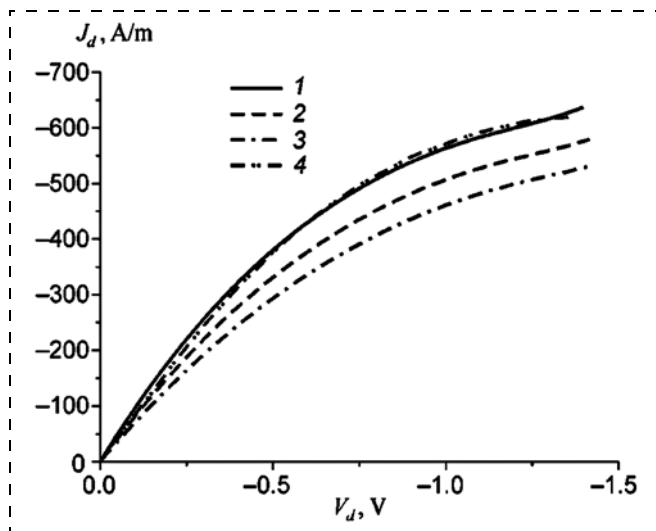


Рис. 3. Выходные характеристики однозатворного ПГТ 2 с длиной канала 3 мкм при различных толщинах диэлектрика, рассчитанные по модели 2: 1 — $d = 8,5 \text{ нм}$; 2 — $d = 9,5 \text{ нм}$; 3 — $d = 10,5 \text{ нм}$; 4 — экспериментальные данные [17]

Fig. 3. Output characteristics of 3- μm single-gate FET 2 for various dielectric widths calculated with the use of the model 2: 1 — $d = 8.5 \text{ nm}$; 2 — $d = 9.5 \text{ nm}$; 3 — $d = 10.5 \text{ nm}$; 4 — the experimental data [17]

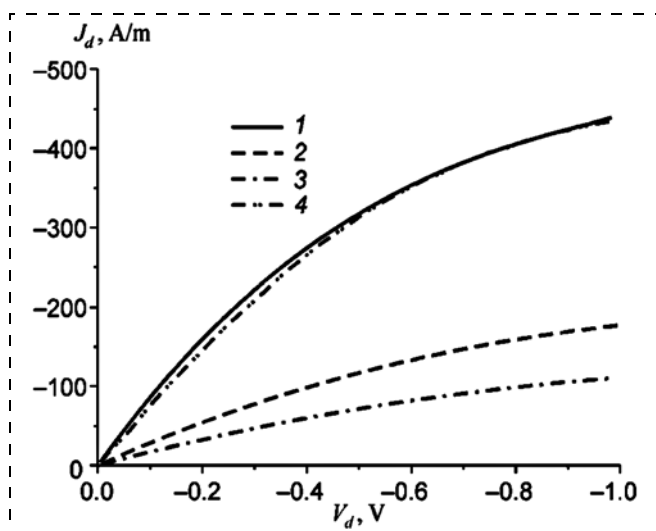


Рис. 4. Выходные характеристики однозатворного ПГТ 2 при различных длинах канала, рассчитанные по модели 2: 1 — $L = 3 \text{ мкм}$; 2 — $L = 6 \text{ мкм}$; 3 — $L = 9 \text{ мкм}$; 4 — экспериментальные данные [17]

Fig. 4. Output characteristics of single-gate FET 2 for various channel lengths calculated with the use of the model 2: 1 — $L = 3 \mu\text{m}$; 2 — $L = 6 \mu\text{m}$; 3 — $L = 9 \mu\text{m}$; 4 — the experimental data [17]

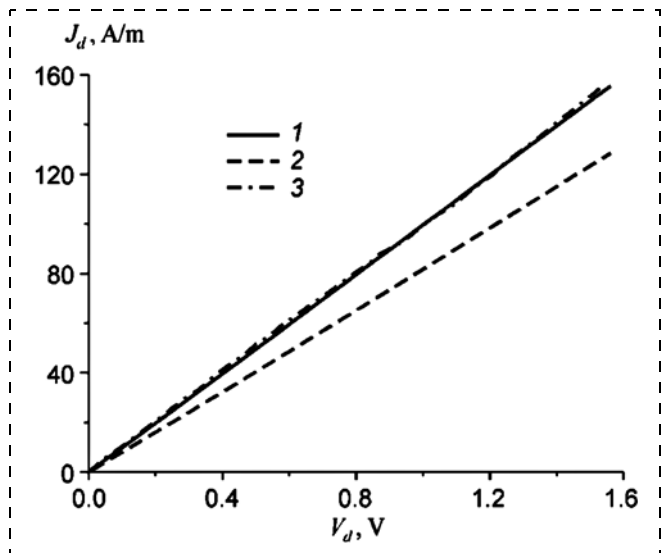


Рис. 5. Выходные характеристики двухзатворного ПГТ 1 с длиной канала 5 мкм при различных значениях температуры окружающей среды, рассчитанные по модели 2: 1 — $T = 300 \text{ К}$; 2 — $T = 77 \text{ К}$; 3 — экспериментальные данные при $T = 300 \text{ К}$ [16]

Fig. 5. Output characteristics of 5- μm dual-gate GFET 1 for various temperatures calculated with the use of the model 2: 1 — $T = 300 \text{ K}$; 2 — $T = 77 \text{ K}$; 3 — the experimental data for the room temperature [16]

следовало ожидать, с уменьшением температуры ток стока падает. При этом получено хорошее согласование результатов моделирования (кривая 1) для случая напряжения на верхнем затворе, равном -1 В , при комнатной температуре с экспериментальными данными (кривая 3) из работы [16]. При расчетах использован параметр $h = 0,06 \text{ м}^2/(\text{В} \cdot \text{с})$, а $R_d = R_s = 0 \text{ Ом}$.

Закключение

В работе предложены комбинированные модели одно- и двухзатворных полевых графеновых транзисторов на основе уравнений квантовой диффузионно-дрейфовой модели. В моделях допустим совместный учет ряда важных факторов, а именно: 1) подвижностей электронов и дырок; 2) квантовой емкости; 3) сопротивлений стока и истока и возможного их различия. Модель 1 является упрощенной и ее можно использовать для экспрессных инженерных оценок. Результаты, полученные с помощью модели 1, согласуются качественно либо с результатами расчета по известным моделям, либо с экспериментальными данными. В модели 2 электростатический потенциал находится на основе самосогласованного расчета и приводит к более точным количественным результатам, нежели модель 1. Так, с ее применением получено хорошее согласование результатов моделирования с экспериментальными данными как для однозатворного, так и для двухзатворного ПГТ. С использованием предложенных моделей исследовано влияние различных факторов на вольт-амперные характе-

ристики приборов. Программы, реализующие модели, включены в систему моделирования наноэлектронных устройств NANODEV [13–15].

Работа выполнена в рамках Государственной программы научных исследований "Конвергенция" Республики Беларусь.

Список литературы

1. Быстров Р. П., Гуляев Ю. В., Никитов С. А., Соколов А. В. Микро- и наноэлектроника применительно к системам радиолокации и радиосвязи // Успехи современной радиоэлектроники. 2010. № 9. С. 11–50.
2. Ferrari A. C., Bonaccorso F., Fal'ko V., Novoselov K. S. et al. Science and technology roadmap for graphene, related two-dimensional crystals, and hybrid systems // Nanoscale. 2015. Vol. 7. P. 4598–4810.
3. Абрамов И. И., Коломейцева Н. В., Лабунов В. А., Романова И. А. Моделирование резонансно-туннельных диодов на основе графена на подложках различного типа // Нано- и микросистемная техника. 2015. № 11. С. 3–10.
4. Абрамов И. И. Основы моделирования элементов микро- и наноэлектроники. Saarbrücken: LAP LAMBERT Academic Publishing, 2016. 444 с.
5. Абрамов И. И. Лекции по моделированию элементов интегральных схем. М.; Ижевск: НИЦ РХД, 2005. 152 с.
6. Абрамов И. И. Лекции по моделированию элементов интегральных схем микроэлектроники. Saarbrücken: LAP LAMBERT Academic Publishing, 2012. 116 с.
7. Thiele S. A., Schaefer J. A., Schwierz F. Modeling of graphene metal-oxide-semiconductor field-effect transistors with gapless large-area graphene channels // J. Appl. Phys. 2010. Vol. 107. P. 094505-1–8.
8. Абрамов И. И., Коломейцева Н. В., Лабунов В. А., Романова И. А. Моделирование электрических характеристик полевых графеновых транзисторов с использованием упро-

щенной комбинированной модели // Материалы 26-й Международной Крымской конференции "СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии", 2016, Россия, Севастополь. Т. 7. С. 1534–1540.

9. Abramov I. I., Labunov V. A., Kolomejtseva N. V., Romanova I. A. Simulation of field-effect transistors and resonant tunneling diodes based on graphene // Proc. of SPIE. 2016. Vol. 10224. P. 102240V-1–10.

10. Tian J., Katsounaros A., Smith D., Hao Y. Graphene field-effect transistor model with improved carrier mobility analysis // IEEE Trans. Electron. Dev. 2015. Vol. 62, N. 10. P. 3433–3440.

11. Landauer G. M., Jimenez D., Gonzalez J. L. An accurate Verilog-A compatible compact model for graphene field-effect transistors // IEEE Trans. Nanotechnol. 2014. Vol. 13, N. 5. P. 895–904.

12. Thiele S. A., Schaefer J. A. Modeling of the steady state characteristics of large-area graphene field-effect transistors // J. Appl. Phys. 2010. Vol. 110, N. 3. P. 034506-1–7.

13. Абрамов И. И., Гончаренко И. А., Игнатенко С. А., Королев А. В., Новик Е. Г., Рогачев А. И. Система моделирования наноэлектронных приборов — NANODEV // Микроэлектроника. 2003. Т. 32, № 2. С. 124–133.

14. Abramov I. I., Baranoff A. L., Goncharenko I. A., Kolomejtseva N. V., Bely Y. L., Shcherbakova I. Y. A nanoelectronic device simulation software system NANODEV: New opportunities // Proc. of SPIE. 2010. Vol. 7521. P. 75211E1-1–11.

15. Абрамов И. И. Физика и моделирование приборных структур и устройств микро- и наноэлектроники // Доклады БГУИР. 2014. № 2. С. 32–42.

16. Wang H., Hsu A., Antoniadis D. A., Palacios T. Compact virtual-source current-voltage model for top- and back-gated graphene field-effect transistors // IEEE Trans. Electron. Dev. 2011. Vol. 58, N. 5. P. 1523–1533.

17. Meric I., Dean C., Young A., Hone J., Kim P., Shepard K. L. Graphene field-effect transistors based on boron nitride gate dielectrics // Proc. IEEE Electron Dev. Meeting. 2010. P. 23.2.1–23.2.4.

I. I. Abramov, Dr. Sci. (Phys.-Math.), Professor, N. V. Kolomejtseva, Researcher, V. A. Labunov, Academician of NASB, Academician of RAS, Dr. Sci. (Tech.), Professor, Head of Laboratory, I. A. Romanova, Researcher, Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics, Minsk, 220013, Belarus
E-mail: nanodev@bsuir.edu.by

Corresponding author:

Abramov Igor I., Dr. Sci. (Phys.-Math.), Professor, Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics, Minsk, 220013, Belarus, nanodev@bsuir.edu.by

Simulation of Graphene Field-Effect Transistors with the Single and Dual Gates

Received on June 19, 2017

Accepted on July 10, 2017

Simulation of the single- and dual-gate field-effect transistors based on a monolayer graphene was carried out with the use of the developed combined models. Influence of different factors on the IV-characteristics of devices was investigated. The simulation results agree well with the experimental data.

Keywords: field-effect transistor, monolayer graphene, IV-characteristic, combined model, simulation

For citation:

Abramov I. I., Kolomejtseva N. V., Labunov V. A., Romanova I. A. Simulation of Graphene Field-Effect Transistors with the Single and Dual Gates, *Nano- i Mikrosistemnaya Tekhnika*, 2017, vol. 19, no. 12, pp. 714–721.

DOI: 10.17587/nmst.19.714-721

Introduction

In high-frequency nanoelectronics a lot of attention is devoted to development of devices on the basis of carbon nanomaterials [1]. In particular, development of graphene field-effect transistors (GFET) is considered promising [2]. This explains the current intensive research works for development of models of such devices, without which their optimization will be simply impossible. An analysis shows, that in GFET models it is important to take into account the following factors: the mobility of the electrons and holes; the quantum capacitance; the drain and source resistances.

The aim of the work is simulation with account of the above-mentioned factors of the IV-characteristics of GFET with single and dual gates based on a monolayer graphene with the use of the proposed combined models.

Models

As we pointed out [3], a transport description in graphene required as initials the equations of the quantum electrodynamics. However, in the cases of a monolayer graphene on substrates of various types considered in the paper it is possible to use equations of non-relativistic quantum mechanics and more simple quantum models resulting from them [4]. An analysis shows that for GFET with the characteristic at the present time sizes as initials it is enough to use the equations of the quantum diffusion-drift model [4].

Let us consider the proposed combined models of GFET.

As model 1 a simplified combined dual-gate model of GFET (according to classification [4–6]) was used integrating elements of the physical and electric models.

At the first stage in model 1 we calculate the quantum capacitance according to the following simplified formula [7]

$$C_q = \frac{2q^3}{\pi(\hbar V_F)^2}, \quad (1)$$

where q — the electron charge; $\hbar$ — the Planck constant, divided by 2π , the Fermi velocity $V_F = 10^6$ m/s.

Then we calculate the capacitances of the gates (for a dual-gate GFET) or capacitance of a gate (for a single-gate GFET) according to the following formula:

$$C_g = \frac{C_q C_{in}}{C_q + C_{in}}, \quad (2)$$

where C_{in} — the capacitance formed between the gate and graphene layer.

Then, we calculate the electrostatic potential of the channel according to the following formula

$$V = \frac{C_{gt}(V_{tg} - V_{tg0} - V(x)) + C_{gb}(V_{beff} - V(x))}{C_{gt} + C_{gb} + \alpha C_q}, \quad (3)$$

where C_{gt} , C_{gb} — the top- and back-gate capacitances, V_{tg} — the top-gate voltage; V_{beff} — the effective back-gate voltage; V_{tg0} — the Dirac top-gate voltage; $V(x)$ — the electrostatic potential of the channel at a zero shift for $V(x=0) = 0$ and $V(x=L) = V_{ch}$, V_{ch} — the complete voltage drop in the channel, capacitance coefficient $\alpha = 0,5$ at $q|V| \gg kT$, k — Boltzmann constant, T — environmental temperature.

Expression (3) is applicable for the dual-gate GFET. In case of a single-gate GFET (3), it will be transformed in the following way:

$$V = \frac{C_g(V_g - V_{g0} - V(x))}{C_g + \alpha C_q}, \quad (4)$$

where V_g — the gate voltage; V_{g0} — Dirac voltage for the gate.

The quantum phenomena can be taken into account by means of an effective mobility of the charge carriers μ , considering the mobility of the electrons and holes, total transport sheet carrier density in graphene Q and quantum capacitance C_q . At the second stage on the basis of the obtained electrostatic potential in the channel the effective mobility of the charge carriers in graphene μ is calculated in accordance with model (10) from [10], taking into account the mobility of the electrons and the holes, and also the total transport sheet carrier density in graphene Q according to [11]:

$$Q = \frac{q\pi(kT)^2}{3(\hbar V_F)^2} + \frac{q^3 V^2}{\pi(\hbar V_F)^2} + q\left(\frac{\Delta^2}{\pi\hbar^2 V_F^2}\right), \quad (5)$$

where Δ — the inhomogeneity of the electrostatic potential.

For finding of the drain current a formula obtained from the quantum diffusion-drift model is used [8, 9]:

$$I_d = \frac{W \int_0^{V_{ch}} \mu Q dV}{L + \left| \int_0^{V_{ch}} \frac{\mu}{V_{sat}} dV \right|}, \quad (6)$$

where W — the channel width; L — the channel length; V_{sat} — the saturation velocity. The saturation velocity is calculated on the basis of formula (11) from [10].

We should point out that, if we do not take into account the quantum phenomena and voltage drops on the drain and source areas, then $V_{ch} = V_d$ (V_d — the voltage applied to the drain in relation to the source), and the formula (6) leads to the traditional diffusion-

drift model used by many authors (sometimes with modifications and corrections) for calculation of the drain current of GFET.

At the final stage, after we find I_d , we recalculate V_d with account of the voltage drops on the resistances of drain R_d and source R_s , that is $V_d = V_{ch} + (R_d + R_s)I_d$. We should point out that in a general case $R_d \neq R_s$ and are not equal to 0.

Let us consider model 2 of GFET.

At the first stage, just like in model 1, we calculate the quantum capacitance according to the simplified formula (1) and the capacitances of the gates according to formula (2).

Unlike model 1, by means of the iterative method we calculate self-consistently the electrostatic potential of the channel according to formula (3) (taking into account the capacitance coefficient α) and the quantum capacitance according to formula [7]:

$$C_q = \frac{2q^3}{\pi(\hbar V_F)^2} |V|. \quad (7)$$

In relation (3) formula (14) from [10] for α is used, which takes into account its variation depending on the electrostatic potential in channel V . Recalculation of the values is carried out self-consistently until the moment, when the variation of the electrostatic potential in the channel reaches the defined value. In case of a single-gate GFET the formula (4) is used.

The effective mobility μ , total transport sheet carrier density in graphene Q are calculated just like in model 1. The saturation velocity is calculated with account of scattering on the optical phonons on the basis of the model [12]:

$$V_{sat} = \begin{cases} \frac{2V_F}{\pi}, & \text{если } |Q_{net}| \leq q|\rho_{crit}| \\ \frac{2q\Omega}{\pi^2 \hbar V_F |Q_{net}|} \sqrt{\frac{\pi(\hbar V_F)^2 |Q_{net}|}{q} - \left(\frac{\hbar\Omega}{2}\right)^2}, & \text{если } |Q_{net}| > q|\rho_{crit}|; \end{cases} \quad (8)$$

$$\rho_{crit} = \frac{1}{2\pi} \left(\frac{\Omega}{V_F} \right), \quad (9)$$

where ρ_{crit} — the critical charge carrier density; Q_{net} — the charge carrier density in the channel ($Q_{net} = |\alpha C_q V|$); $\hbar\Omega$ — effective energy of the optical phonons.

The drain current is calculated in accordance with (6). The final stage of the calculations coincides with that for model 1. Model 2 is more adequate in comparison with model 1 and it also allows us to obtain a good agreement with the experimental data, because the electrostatic potential in the channel and the quan-

tum capacitance are calculated self-consistently. As a rule, the model parameters for agreement with the experimental data are the resistances of drain R_d and source R_s , and also h in the effective mobility of the charge carriers [10].

The developed programs realizing the described models are included in the simulation system of nano-electronic devices NANODEV [13–15], developed in BSUIR since 1995 and intended for PC.

Simulation results

With application of the developed combined models 1 and 2 calculations of the output characteristics of the single- and dual-gate GFET on a monolayer graphene were performed. The calculations were carried out at 300 K, unless otherwise indicated. The diagrams present the results for the drain current or more accurately the drain current density for convenience of comparison with the results of the other models or with the experimental data.

Fig. 1 presents a cross-section of a dual-gate GFET based on monolayer graphene. In case of a single-gate GFET the top gate is absent. The back-gate of the dual-gate GFET is separated from the channel by a thick dielectric. It is necessary for the position of the electroneutrality point and the conductivity type control.

The basic data for the calculation are: length and width of the channel, thicknesses of the dielectric layers for the top- and back-gates, or, in case of a single-gate GFET, dielectric thickness of the gate; mobility of the electrons and the holes in graphene, dielectric constant of the dielectric for the top- and back-gates, Fermi velocity in the graphene monolayer, inhomogeneity of the electrostatic potential, the optical phonon energy, depending on the subgate dielectric; the voltages applied to a device, the environmental temperature; the drain and source resistances; Dirac point voltage for the top- and back-gates.

Let us consider the results of the calculations received by means of the model 1. Fig. 2 presents the output characteristics of GFET 1 at different resistances of drain R_d and source R_s . GFET 1 lays on the substrate of SiO₂/Si and has two gates. A thin layer of Al₂O₃ is the dielectric of the top gate. Length of the channel $L = 5 \mu\text{m}$, and the other parameters of GFET 1 are presented in the paper [16]. The characteristics were calculated with account of not only the electron, but also the hole conductivity. We should point out that the simulation results for $R_d \neq R_s$ case reflect qualitatively correctly the known experimental data [16], that is, with the growth of R_d the drain current decreases.

Further we present the results of the calculations received only by means of model 2.

Fig. 3 presents the output characteristics of a single-gate GFET 2 with channel length $L = 3 \mu\text{m}$ [17] at different values of the dielectric's thickness. Hexagonal

boron nitride (h-BN) is the gate dielectric. The calculations were carried out for the case of $V_{gs} = -2$ V, the effective energy of the optical phonons $\hbar\Omega = 200$ meV. Curve 1 corresponds to the h-BN thickness of 8.5 nm, curve 2 — 9.5 nm, curve 3 — 10.5 nm. It was established that an increase of the dielectric thickness leads to a reduction of the drain current. We should underline a good agreement of the simulation results using parameters $h = 0.187$ m²/(V·s), $R_d = R_s = 200$ Ω (curve 1) with the experimental data (curve 4) [17].

Fig. 4 presents the output characteristics of GFET 2 at different channel lengths. The calculations were done for $V_{gs} = -1.5$ V. Curve 1 corresponds to the channel length of 3 μm, curve 2 — 6 μm, curve 3 — 9 μm. It is visible, that with an increase of the channel length the drain current decreases considerably, which agrees with the known data for GFET. Also a good agreement with the experimental data (curve 4) of the paper [17] was also received of the simulation results using parameters $h = 0.24$ m²/(V·s), $R_d = R_s = 200$ Ω (curve 1).

Calculations of the output characteristics of the dual-gate GFET 1 at various environmental temperature (fig. 5). Were carried out by means of model 2. In calculations the effective energy of the optical phonons $\hbar\Omega = 55$ meV was used. As it have been expected, the drain current falls with reduction of the temperature. At that, a good agreement of the simulation results (curve 1) with the experimental data (curve 3) from [16] for the case of top gate voltage the equal to -1 V at the room temperature was obtained. During the calculations we used the parameter $h = 0.06$ m²/(V·s), and $R_d = R_s = 0$ Ω.

Conclusion

The combined models of the single- and dual-gate field graphene transistors based on equations of the quantum diffusion-drift model were proposed. The models include following important factors: 1) mobility of the electrons and the holes; 2) quantum capacitance; 3) resistances of the drain and the source, and their possible differences. Model 1 is a simplified one and it can be used for express engineering estimations. The results received by means of model 1 are qualitatively agreement with the calculation results obtained with the known models, or with the experimental data. In model 2 the electrostatic potential is found by a self-consistent calculation and leads to more accurate quantitative results, than model 1. Thus, its application ensured a good agreement of the simulation results with the experimental data both for the single- and dual-gate GFET. With the use of the proposed models the influence of various factors on the IV-characteristics of devices was investigated. The programs realizing the models were included in simulation system of nanoelectronic devices NANODEV [13–15].

The work was done within the framework of the "Convergence" State Scientific Research Program of the Republic of Belarus.

References

1. Bystrov R. P., Guluaev Ju. V., Nikitov S. A., Sokolov A. V. Micro- and nanoelectronics relating to radar and radio communication system, *Uspekhi sovremennoi radioelektroniki*, 2010, no. 9, pp. 11–50 (in Russian).
2. Ferrari A. C., Bonaccorso F., Fal'ko V., Novoselov K. S. et al. Science and technology roadmap for graphene, related two-dimensional crystals, and hybrid systems, *Nanoscale*, 2015, vol. 7, pp. 4598–4810.
3. Abramov I. I., Kolomejtseva N. V., Labunov V. A., Romanova I. A. Simulation of graphene resonant tunneling diodes on the substrates of various types, *Nano- and Mikrosistemnaya Tekhnika*, 2015, no. 11, pp. 3–10.
4. Abramov I. I. *Bases of micro- and nanoelectronic devices simulation*. Saarbrücken: LAP LAMBERT Academic Publishing, 2016. 444 p. (in Russian).
5. Abramov I. I. *Lectures on simulation of integrated circuits elements*, Moscow—Izhevsk: RCD, 2005. 152 p. (in Russian).
6. Abramov I. I. *Lectures on simulation of integrated circuits elements of microelectronics*. Saarbrücken: LAP LAMBERT Academic Publishing, 2012. 116 p. (in Russian).
7. Thiele S. A., Schaefer J. A., Schwierz F. Modeling of graphene metal-oxide-semiconductor field-effect transistors with gapless large-area graphene channels, *J. Appl. Phys.*, 2010, vol. 107, pp. 094505-1–8.
8. Abramov I. I., Kolomejtseva N. V., Labunov V. A., Romanova I. A. Simulation of electrical characteristics of graphene field-effect transistors with the using of simple combined model, *26th International Crimean Conference "Microwave & Telecommunication Technology" (CriMiCo '2016)*, Sevastopol: Weber Publishing, 2016, vol. 7, pp. 1534–1540 (in Russian).
9. Abramov I. I., Labunov V. A., Kolomejtseva N. V., Romanova I. A. Simulation of field-effect transistors and resonant tunneling diodes based on graphene, *Proc. of SPIE*, 2016, vol. 10224, pp. 102240V-1–10.
10. Tian J., Katsounaros A., Smith D., Hao Y. Graphene field-effect transistor model with improved carrier mobility analysis, *IEEE Trans. Electron. Dev.* 2015, vol. 62, no. 10, pp. 3433–3440.
11. Landauer G. M., Jimenez D., Gonzalez J. L. An accurate Verilog-A compatible compact model for graphene field-effect transistors, *IEEE Trans. Nanotechnol.*, 2014, vol. 13, no. 5, pp. 895–904.
12. Thiele S. A., Schaefer J. A. Modeling of the steady state characteristics of large-area graphene field-effect transistors, *J. Appl. Phys.*, 2010, vol. 110, no. 3, pp. 034506-1–7.
13. Abramov I. I., Goncharenko I. A., Ignatenko S. A., Korolev A. V., Novik E. G., Rogachev A. I. NANODEV: A nanoelectronic device simulation software system, *Russian Microelectronics*, 2003, vol. 32, no. 2, pp. 97–104.
14. Abramov I. I., Baranoff A. L., Goncharenko I. A., Kolomejtseva N. V., Bely Y. L., Shcherbakova I. Y. A nanoelectronic device simulation software system NANODEV: New opportunities, *Proc. of SPIE*, 2010, vol. 7521, pp. 75211E1-1–11.
15. Abramov I. I. Physics and simulation of various micro- and nanoelectronic devices, *Doklady BSUIR*, 2014, no. 2, pp. 32–42 (in Russian).
16. Wang H., Hsu A., Antoniadis D. A., Palacios T. Compact virtual-source current-voltage model for top- and back-gated graphene field-effect transistors, *IEEE Trans. Electron. Dev.*, 2011, vol. 58, no. 5, pp. 1523–1533.
17. Meric I., Dean C., Young A., Hone J., Kim P., Shepard K. L. Graphene field-effect transistors based on boron nitride gate dielectrics, *Proc. IEEE Electron Dev. Meeting*, 2010, pp. 23.2.1–23.2.4.

Ю. В. Ларионов, ст. науч. сотр., e-mail: luv@kapella.gpi.ru,
Институт общей физики им. А. М. Прохорова РАН, Москва,
Ю. В. Озерин, вед. инженер, e-mail: yozerin@mikron.ru,
ПАО "Микрон", Москва, Зеленоград

ВАРИАЦИЯ ЗНАЧЕНИЙ ШИРИНЫ ВЫСТУПОВ ПРИ ИЗМЕРЕНИИ ИХ В НИЗКОВОЛЬТНОМ РЭМ

Поступила в редакцию 13.07.2017

Меры ширины для растрового электронного микроскопа (РЭМ) подвергаются многократным сканированиям аттестованной структуры (выступа). Выявилось, что в результате многократных сканирований выступа в низковольтном РЭМ возможно не только увеличение, но и уменьшение значений ширины. Исследованы особенности и причины этого явления.

Ключевые слова: нанометрология, низковольтный РЭМ, рельефная структура, контаминация, электрический заряд на поверхности

Введение

Стабильность измерений особенно важна в нанометрологии — области знаний, которая только осваивается для практического использования, в частности для нанoeлектроники. Для ее освоения требуется четкое представление о процессах, происходящих в наномире, которое сегодня является далеко не полным.

Одно из неприятных явлений в нанометрологии линейных измерений — увеличение ширины (уширение) выступа меры в ходе ее эксплуатации в растровом электронном микроскопе (РЭМ). Оно возникает даже в сверхвысоковакуумном РЭМ вследствие осаждения тонкой (порядка 0,1 и 1 нм) углеводородной пленки на поверхность рельефной структуры. Однако РЭМ-изображение выступа, сформированного в слое диэлектрика, способно сжиматься из-за наведения электрических зарядов на ее поверхности [1], уменьшая измеренное значение ширины. Мы экспериментально обнаружили уменьшение значений ширины выступа, сформированного травлением кремниевой подложки (подобного выступу в мере ширины МШПС-2 [2]). В данной работе мы представляем результаты исследования обнаруженного явления для выступов, более близких по способу изготовления к выступам, формируемым в производстве БИС. Цель исследования — выяснение деталей механизма уменьшения значений ширины полупроводниковых выступов, формирование целостной картины явления.

Условия эксперимента

Объекты измерений. Основную часть исследований проводили на выступах, сформированных в кремниевой пластине с помощью плазмохимического травления подложки, с разной формой профиля. Выступы с различающимися профилями верхнего основания (ВО) формировались с помо-

щью разных вариантов изготовления маски: для одного типа маски — выступы с почти плоским ВО, для другого — со скруглениями на его границах. Боковые стенки этих выступов также формировались по-разному — с большим или меньшим наклоном. Глубина травления кремниевой пластины в обоих случаях составляла ~350 нм. Кроме того, были созданы выступы в слое поликремния толщиной около 200 нм, лежащего на тонком диэлектрике (по технологии изготовления "затворов", также с использованием плазмо-химического травления). Боковые стенки в этом случае выполняются обычно либо вертикальными, либо имеют небольшой "отрицательный" клин. После завершения травления выступов все участки их поверхности оказывались покрытыми слоем естественного оксида толщиной 1,5...2,0 нм.

Средство измерения. Для измерения ширины выступов использовали измерительный РЭМ S9260 (Хитаچی), предназначенный для контроля линейных размеров ИС до 100 нм в производственных условиях. Калибровку его увеличения проводили с помощью меры периода фирмы "Хитаچی" в виде рельефной решетки на кремниевой пластине с шагом 240 нм. РЭМ работает в низковольтном режиме (0,3...1,6 кВ). В наших экспериментах он использовался при энергии электронного пучка 0,8 кэВ, при этом ток пучка составлял обычно около 6 пА, увеличение ~120 000...180 000 крат, размер поля $0,748 \times 0,748$ нм, размер пикселя ~1,46 нм. В указанном диапазоне энергии пучка фирма-изготовитель РЭМ обеспечивает разрешение 3 нм, при этом воспроизводимость линейных измерений составляет по данным изготовителя около 2 нм (3σ). Для дополнительного уменьшения случайной погрешности измерений сканирование одного выступа проводили 32 раза для формирования одного кадра, после чего компьютер усреднял зафиксированные изображения.

Методика проведения измерений. Значение ширины ВО определялось по кривой видеосигнала (ВС), которая получалась усреднением всех кривых ВС по отдельным строкам изображения. Программа измерения ширины позволяла выделить фиксированные точки на кривой ВС и определить расстояние между ними, используя для этого калиброванное значение размера пикселя. Положение точек, между которыми измерялось расстояние, выбиралось в соответствии с критерием соответствия угловых точек выступа и особых точек на кривой ВС [3].

Результаты

На рис. 1 показаны правые участки трех кривых ВС, полученных в результате сканирования одного выступа в одном его сечении через два временных промежутка. Пики амплитуды соответствуют правому краю верхнего основания выступа. Каждая из кривых смещалась по вертикали так, чтобы совпали усредненные значения амплитуды кривых, соответствующие верхнему основанию выступа. Кроме того, каждая из кривых смещалась вдоль горизонтальной оси относительно других так, чтобы они все совпали в точке с координатой $X = 160$ нм при амплитуде 400 у. е. (на середине внутренней (правой) стороны левого пика амплитуды не показано).

Хорошо заметно, что пик кривой ВС, соответствующий правому краю ВО, изменяет и расположение (смещаясь вдоль оси абсцисс), и свою форму при повторных сканированиях. Его смещение (по уровню амплитуды 400 у. е.) относительно общей точки всех кривых на середине внутренней

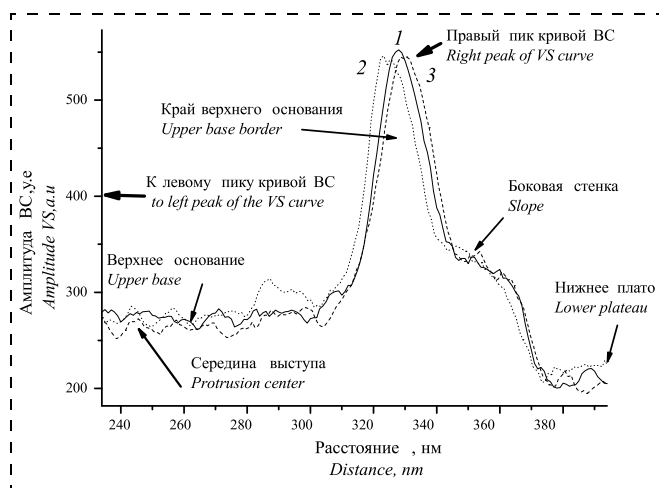


Рис. 1. Правые части кривых ВС (стрелками отмечены участки, соответствующие деталям профиля выступа). Кривая 1 соответствует начальному скану выступа, 2 — 50-му скану, 3 — начальному скану через 4 месяца

Fig. 1. The right parts of VS curves (arrows designate the sites corresponding to the parts of the ledge profile). Curve 1 corresponds to the initial scan of the ledge, 2 to the 50th scan, 3 to the initial scan after 4 months

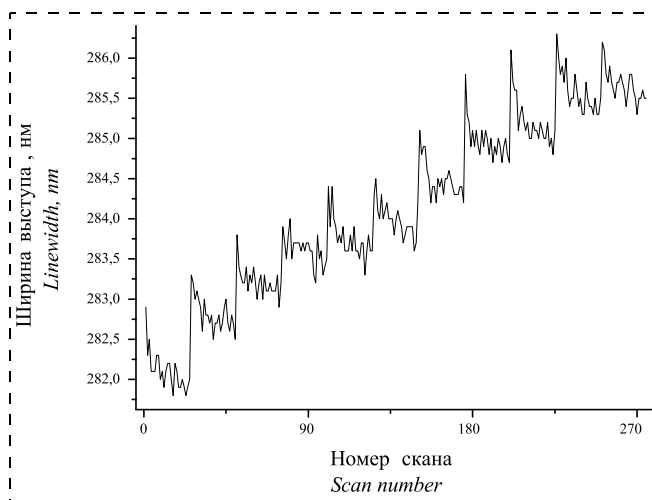


Рис. 2. Вариация значений ширины выступа в ходе его сканирования с десятью прерываниями (с выводом пластины из вакуума). Видны 11 циклов сканирования с характерным уменьшением значений в каждом цикле. Последующие скачки возникают после каждого прерывания

Fig. 2. Variation of the ledge width values during its scanning with ten interruptions (with a withdrawal of the plate from vacuum); 11 cycles of scanning with a characteristic reduction of the values in each cycle are visible. The subsequent leaps appear after each interruption

стороны правого пика (не показана) соответствуют либо уменьшению ширины верхнего основания на ~2,4 нм (кривая 2), либо ее увеличению (на 0,8 нм (кривая 3).

Показанное смещение пика кривой ВС (и вариация ширины выступа) не является случайностью выбора условий измерения. На рис. 2 показана зависимость усредненного (по всем сечениям выступа на РЭМ-изображении) значения ширины другого выступа от номера скана. Заметны характерные спады с последующими скачками значений ширины. Скачки на 25-м, 50-м, 75-м и т. д. сканах возникают после перерыва в сканировании продолжительностью от нескольких часов до нескольких суток (с выводом пластины с контролируемым выступом из вакуума). Шум сигнала на кривой, составляющий ~0,2...0,3 нм, не мешает зафиксировать скачки с размахом 1...1,5 нм после каждого перерыва. Увеличение ширины при наличии шума надежнее оценить по изменению средних значений в каждом непрерывном цуге сканов. Усредненное по 10 цугам увеличение составило 0,4 нм/цуг. Рост усредненного значения ширины является почти линейным.

Спады значений ширины возникают лишь после непрерываемой последовательности сканов. На рис. 3 показана зависимость значений ширины от числа сканов для одиночных сканирований, разделенных перерывами (с выводом пластины из вакуума). Видно, что в этом случае характерное уменьшение значений ширины отсутствует.

Отметим другие особенности вариации значений ширины. Во-первых, общий рост значений

при единичных сканированиях меньше, чем при сканированиях непрерываемой последовательностью сканов (~1,7 против ~3,5 нм после 11 сканов). Во-вторых, случайные отклонения от линейного роста значений ширины при единичных сканах возникают чаще. Таким образом, последовательное сканирование увеличивает рост значений и стабилизирует его. Однако рост не пропорционален числу сканов: 25-кратное увеличения их числа

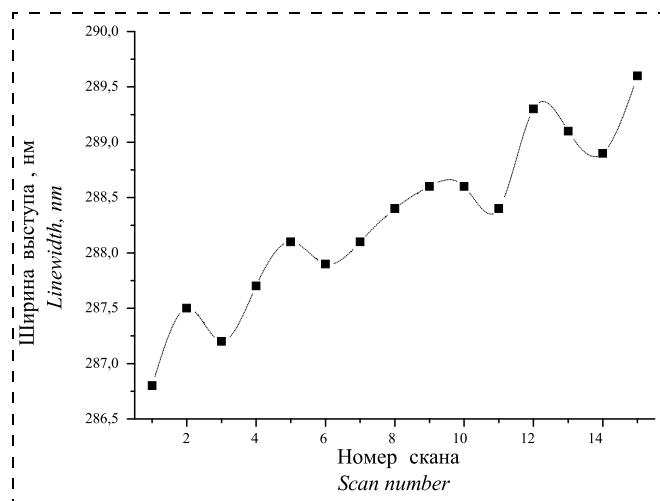


Рис. 3. Зависимость значений ширины от числа сканов при одиночных сканированиях, разделенных перерывами с выводом пластины из вакуума. Характерное уменьшение значений ширины отсутствует

Fig. 3. Dependence of the width values on the number of scans in case of single scanings divided by breaks with a withdrawal of the plate from vacuum. Characteristic reduction of the width values is absent

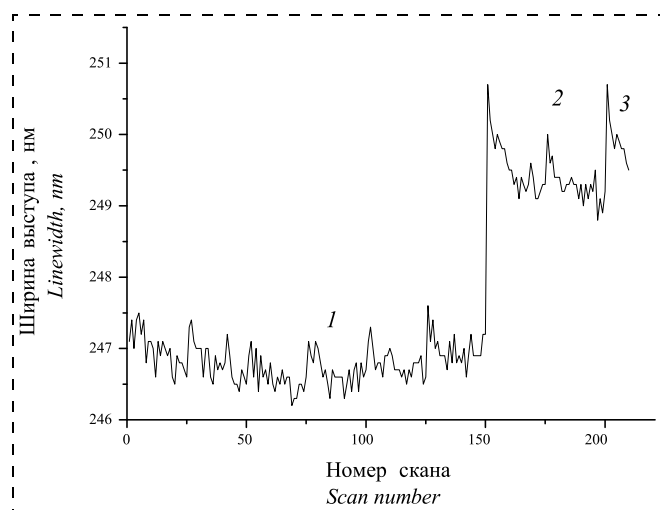


Рис. 4. Вариация значений ширины от числа сканов: этап 1 — непрерывное сканирование с пятью вакуумными паузами (после 25, 50 и др. до 150-го сканов) продолжительностью в 5 мин; этап 2 — непрерывные сканы 151...200 с одной вакуумной паузой после 175-го скана; этап 3 — непрерывное сканирование в сканах 200...210

Fig. 4. Variation of the width values depending on the number of scans: stage 1 — continuous scanning with five vacuum pauses (after the 25th, the 50th, etc. up to the 150th scans) with duration of 5 min.; stage 2 — continuous scans, the 151st...200th with one vacuum pause after the 175th scan; stage 3 — continuous scanning in 200...210 scans

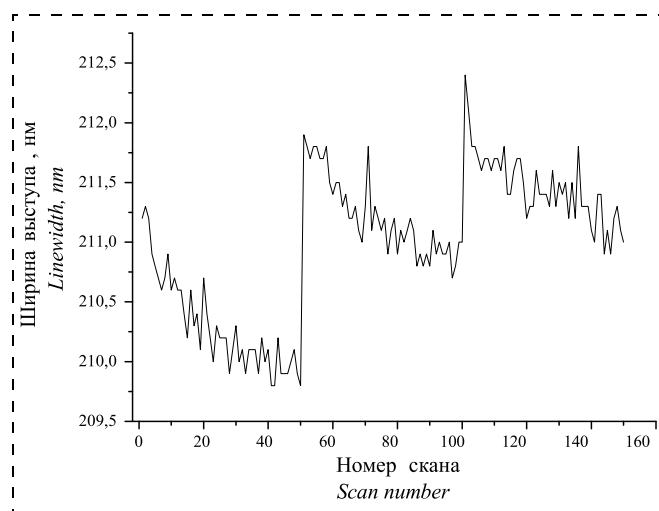


Рис. 5. Вариация значений ширины выступа, сформированного в слое поликремния, от числа сканов. Видны спады размеров при последовательных сканированиях и скачки после пауз в вакууме

Fig. 5. Variation of the values of the width of the ledge, formed in the layer of the polysilicon, depending on the number of scans. Recessions of the sizes are visible during the consecutive scanings and leaps after pauses in vacuum

в случае последовательных сканов лишь удваивает рост ширины.

Характер вариации значений ширины с числом сканов изменяется, если вместо прерывания сканирования с выводом пластины из вакуума осуществляются паузы в сканировании в вакууме. На рис. 4 показано, как изменяется вариация значений ширины от числа сканов в зависимости от способа приостановки сканирования. Первые 150 сканов проведены с паузами в 5 мин после 25, 50, 75 и др. сканов (этап 1) в вакуумной камере. После этапа 1 пластина была выведена в атмосферу на несколько месяцев. Последовательные сканы 151...200 того же выступа проведены с одной вакуумной паузой (после 175-го скана, этап 2). После этого этапа пластина была вновь выведена из РЭМ. Этап 3 продолжился всего десятью непрерываемыми сканами.

Видно, что даже продолжительное (150 сканов) сканирование с паузами практически не изменяет значение ширины. Заметные изменения размеров возникают лишь после атмосферных прерываний сканирования. (Отсутствие пика при первых сканах мы объяснили случайным значением амплитуды ВС.) Отметим наличие на фоне шума локальных пиков значений на этапе 1, а также на этапе 2 с размахом ~0,5 нм после каждой вакуумной паузы в сканировании.

Похожий характер вариации размеров ширины был зафиксирован нами также для выступа с модификацией его профиля, приводящей к скруглениям у границ ВО (с помощью маски другого типа). Подобный характер вариации значений ширины был также зафиксирован и для выступа, сформированного в слое поликремния (рис. 5).

Таким образом, физические процессы, вызывающие обнаруженный характер вариации размеров, являются едиными для всех исследованных выступов.

Обсуждение

Принципиальная возможность уменьшения значений ширины выступа в результате сканирования его в РЭМ продемонстрирована в модельном эксперименте [1]. В [1] был проведен расчет кривой ВС в РЭМ с использованием модели эмиссии медленных вторичных электронов (МВЭ) из выступа, диэлектрическая поверхность которого заряжается в результате сканирования ее электронным пучком. Модель эмиссии реализована путем расчета рассеяния падающего пучка электронов в материале выступа и подложки, расчета заряжаемого поверхностного слоя, генерации рассеянных электронов и МВЭ, эмитируемых поверхностью, методом Монте-Карло. Геометрической моделью выступа служил выступ в слое РММА (электронорезиста), расположенный на подложке кремния с подслоем оксида или без него. Высота выступа 750 нм, ширина 250 нм, наклон боковых стенок 2°. Параметры сканирования близки к соответствующим в нашем эксперименте: энергия электронов 1,5 кэВ, ток 10 пА.

В результате моделирования выяснилось, что в поверхностном слое РММА наводятся электрические заряды. Плотность зарядов и их знак распределены вдоль поверхности неравномерно: центральная часть ВО оказалось заряженной отрицательно, участки ВО, прилегающие к его границам, а также прилегающие к последней части боковых стенок — положительно. Такое распределение зарядов вдоль поверхности внесло изменение в пространственную плотность эмиссии МВЭ от угловых участков выступа и изменило профиль кривой ВС от углов ВО. В результате пики кривой ВС сместились к середине выступа и расстояние между ее точками, по которым измерялась ширина выступа, уменьшилось. Уменьшение ширины оказалось зависимым от энергии электронов в падающем пучке, ширины и высоты выступов, от угла наклона его боковых стенок, от близости расположения соседних выступов и от числа сканирований. Диапазон уменьшения ширины — от 1 до 11 нм. Вариация условий сканирования и параметров выступа ни в одном случае не привела к уширению выступа.

В наших выступах, в отличие от модельных, заряды наводятся, по-видимому, в поверхностных пленках естественного оксида и контаминации. При многократных непрерывных сканированиях выступа значение ширины во всех случаях вначале уменьшалось, а с увеличением числа сканов стабилизировалось. Эти уменьшения размеров можно

объяснить (как в модельном эксперименте) заряджением диэлектрических слоев выступа. Однако отметим, что прерывания с выводом образца из вакуума и паузы в сканировании образца в вакууме привели во всех случаях к увеличению значений ширины.

Таким образом, причиной зафиксированного нами сложного характера вариации ширины выступа являются, по-видимому, два процесса, происходящие одновременно: осаждение контаминационной углеводородной пленки на поверхность выступа и электрическое зарядение его поверхностного слоя пучками падающих, рассеянных и эмиттированных электронов. Если первый процесс приводит только к увеличению ширины выступа, то второй способен ее и уменьшать, и также, по-видимому, увеличивать. Мы обнаружили, что в ходе уменьшения значений ширины монотонное контаминационное уширение отсутствует. Уширение (в виде скачков размеров) зафиксировано лишь при повторном сканировании после вывода пластины из вакуума, после того как наведенный при предшествующем сканировании заряд, вероятно, релаксирует. Это уширение появляется, видимо, из-за осаждения контаминационной пленки. Любопытно, что заряд, наведенный при длительном сканировании выступа, вызывает на воздухе большее контаминационное уширение, чем при единичном сканировании (сравни кривые на рис. 2 и 3). Наведенный заряд, по-видимому, стимулирует контаминацию на поверхности выступа. При сканировании же в вакууме паузы приводят, вероятно, лишь к перераспределению зарядов, вызывая временные и небольшие скачки размеров (см. рис. 4), но не приводя контаминационного уширения.

Описанная картина процессов, происходящих на поверхности выступа при сканировании его в низковольтном РЭМ, сложнее представлений о ней в работе [4]. Там предполагается, что осаждение контаминационной пленки пропорционально только дозе электронного облучения и зависит от характера облучения, определяющего доступ углеводородных частиц к сканируемой площади (с учетом лишь "внешних" причин). При этом игнорируются сложные "внутренние" явления, происходящие на поверхности выступа при его сканировании в низковольтном РЭМ.

Заключение

Обнаруженная вариация (увеличение и также уменьшение) размеров ширины выступа с размахом в несколько нанометров в ходе многократного его сканирования в низковольтном РЭМ обусловлена сложной картиной происходящих процессов. Мы предполагаем протекание процессов контаминационного осаждения углеводородных молекул

на поверхность выступа и ее электрического заряжения. Заряжение способно, на наш взгляд, влиять на осаждение контаминационной пленки, существенно уменьшая ее толщину в условиях вакуума. Заметное уширение выступа мы обнаружили лишь при повторном сканировании выступа после вывода платины из вакуума. По нашим представлениям наведенный заряд способен сохраняться в условиях вакуума относительно долго: пятиминутные паузы со сканированием без вывода образца из вакуума, не вызывающие релаксацию заряда, не приводили и к контаминационному уширению. Описанное явление проявляется не только на кремниевых выступах при разных вариантах их изготовления, но также на выступах в слое поликремния, расположенных на диэлектрической пленке, т. е. носит общий характер.

Список литературы

1. Ко Y.-U., Chung M.-S. Monte Carlo simulation of charging effects in linewidth metrology: on insulator substrate // Scanning, 1998. Vol. 20. P. 549—555.
2. Ларионов Ю. В. Вариация изображения выступа в ходе его многократного сканирования в низковольтном РЭМ // Нано- и микросистемная техника. 2016. Т. 18, № 11. С. 659—661.
3. Новиков Ю. А., Озерин Ю. В., Плотников Ю. И., Раков А. В., Тодуа П. А. Линейная мера микрометрового и нанометрового диапазонов для растровой электронной и атомно-силовой микроскопии // Труды ИОФАН. 2006. Т. 62. С. 36—76.
4. Гавриленко В. П., Кузин А. Ю., Митюхляев В. Б., Раков А. В., Тодуа П. А., Филиппов М. Н., Шаронов В. А. Искажение профиля рельефных элементов на поверхности монокристаллического кремния в результате их контаминации в низковольтном растровом электронном микроскопе // Измерительная техника. 2013. № 3. С. 12—17.

Yu. V. Larionov, Senior Researcher, luv@kapella.gpi.ru,

A. M. Prokhorov General Physics Institute, RAS, Moscow, 119991, Russian Federation,

Yu. V. Ozerin, Leading Engineer,

Micron Co, Zelenograd, Moscow, Russia, yozerin@mikron.ru

Corresponding author:

Larionov Yury V., Senior Researcher, A. M. Prokhorov General Physics Institute, RAS, Moscow, 119991, Russian Federation, luv@kapella.gpi.ru

Variation of the Linewidth Values during Measurements in a Low-Voltage SEM

Received on July 13, 2017

Accepted on August 11, 2017

During linewidth measurements by the scanning electron microscopes the certified reference structures are subjected to repeated scans by an electron beam. It was discovered that these structures may not only increase, but also decrease the linewidth values as a result of the multiple scannings in SEM. Peculiarities and main causes of the phenomenon are investigated. The authors believe that variations of the linewidth values are due to two processes: contamination of the surface of the structures and induction of the electric charges in the dielectric layers on the surface. The phenomenon of the decrease of the linewidth values was discovered for the structures etched with different plasma chemical processes in silicon and for the structures etched in the polysilicon on a dielectric layer.

Keywords: nanometrology, low-voltage SEM, relief structure, contamination, surface electrical charge

For citation:

Larionov Yu. V., Ozerin Yu. V. Variation of the Linewidth Values during Measurements in a Low-Voltage SEM, *Nano- i Mikrosistemnaya Tekhnika*, 2017, vol. 19, no. 12, pp. 722—729.

DOI: 10.17587/nmst.19.722-729

Introduction

Stability of measurements is especially important in nanometrology, the field of knowledge, which only begins to be mastered for practical use, in particular, for nanoelectronics. Its development requires a clear idea about the processes in the nanoworld, about which we do not know enough.

One of the unpleasant phenomena in nanometrology of the linear measurements is an increase (broadening) of the ledge linewidth measurements during its exploitation in a scanning electron microscope (SEM).

It appears even in an ultrahigh-vacuum SEM because of the deposition of a thin (about 0.1 and 1 nm) hydrocarbonic film on the surface of a relief structure.

However, a SEM image of the ledge formed in a dielectric layer can shrink because of the electric charges induced on its surface [1], thus reducing the measured width value. We experimentally discovered a reduction of the width values of the ledge formed by etching of the silicon substrate (similar to the ledge in the measure linewidth measure of MShPS-2 [2]). In the work we present the results of the research of the phenomenon for the ledges similar by the way of their manufacturing

to the ledges, formed in LSI manufacture. The aim is clarification of the details of the mechanism of reduction of the width values of the semi-conductor ledges, and formation of a overall picture of the phenomenon.

Experiment conditions

Objects of measurements. Most of the research works were done on the ledges formed in a silicon plate by means of a plasma chemical etching of a substrate, with a different form of the profile. The ledges with differing profiles of the top base (TB) were formed by means of different versions of mask manufacturing: for one type of a mask the ledges had almost flat TB, for another it had roundings on its borders. The lateral walls of those ledges were also formed in different ways — with bigger or smaller inclinations. In both cases the depth of etching of a silicon plate was ~ 350 nm. Besides, ledges were formed in the polysilicon layer with thickness of about 200 nm, laying on a thin dielectric (by the manufacturing technology of "shutters", also with the use of the plasma — chemical etching). In this case the lateral walls are usually made vertical or have a small "negative" slope. After completion of etching of the ledges all the sites of their surface appeared to be covered with a layer of a natural oxide with thickness of 1.5...2.0 nm.

Measuring instrument. For measurement of the width of the ledges measuring SEM S9260 (Hitachi) was used, intended for control of the linear sizes of IC up to 100 nm in production conditions. Calibration of its magnification was done by means of the measure of period from Hitachi in the form of a relief lattice on a silicon plate with a step of 240 nm. SEM works in a low-voltage mode (0.3...1.6 kV). In our experiments it was used at the energy of an electron beam of 0.8 keV, at that, the beam current was about 6 pA, magnification $\sim 120\,000\text{...}180\,000\times$, the size of a field — 0.748×0.748 nm, the size of a pixel ~ 1.46 nm. In the specified energy range of a beam the manufacturer of SEM ensures resolution of 3 nm, at that, the reproducibility of the linear measurements, according to the manufacturer, is about 2 nm (3σ). For an additional reduction of a casual error of measurements the scanning of one ledge for formation of one frame was done 32 times, after which the computer averaged the recorded images.

Measurement technique. The value of the width of TB was determined by using the curve of a video signal (VS), which was obtained by averaging of all the curves of VS of separate lines of the image. The program of the width measurement allowed us to single out the fixed points on VS curve and to determine the distance between them, using for this purpose the calibrated value of the size of a pixel. Positions of the points, the distance between which was measured, were selected according to the criterion of conformity of the angular points of a ledge and special points on VS curve [3].

Results

Fig. 1 presents the right sites of the three VS curves obtained as a result of scanning of one ledge in its one section with two time intervals. The amplitude peaks correspond to the right edge of the TB of the ledge.

Each of the curves was shifted along the vertical, so that the average values of the amplitude of the curves, corresponding to the TB of the ledge, coincided. Besides, each of the curves was shifted along the horizontal axis in relation to the others, so that all of them coincided in the point with co-ordinate $X = 160$ nm at the amplitude of 400 arbitrary units or a. u. (in the middle of the internal (right) side of the left peak of the amplitude, is not shown at Fig. 1).

It is visible, that the peak of the VS curve corresponding to the right edge of TB changes its position (moving along the axis of abscisses) and its form in case of the repeated scanings. Its shift (by the level of the amplitude of 400 a. u.) in relation to the common point of all the curves in the middle of the inner side of the right peak (not shown) corresponds to the reduction of the width value of the TB by ~ 2.4 nm (curve 2) or to its increase (by 0.8 nm (curve 3).

The shown shift of the peak of VS curve (and variation of the ledge width) is not a result of an accidental choice of the measurement conditions. Fig. 2 presents the dependence of the averaged (by all the sections of the ledge on a SEM image) values of the width of the other ledge on the number of a scan. Characteristic slopes with the subsequent leaps of the width values are visible. Leaps on the 25th, 50th, 75th, etc. scans appear after a break in scanning with duration from several hours up to several days (with a withdrawal of the plate with the controlled ledge from vacuum). The signal noise at the curve, equal to $\sim 0.2\text{...}0.3$ nm, does not prevent recording of the leaps of 1...1.5 nm after each break. The increase of the width value in the presence of the noise can be estimated more reliably by variation of the average values in each continuous train of scans. The increase averaged by 10 trains was equal to 0.4 nm/train. The growth of the average value of the width is almost linear.

The slopes of the width values appear only after an uninterrupted sequence of scans. Fig. 3 presents the dependence of the width values on the number of scans for single scanings divided by breaks (with a withdrawal of a plate from vacuum). It is visible, that the characteristic reduction of the width is absent.

We should also mention other specific features of the variation of the width values. First, the common growth of the values in case of individual scanings is less, than in case of the scanings of an uninterrupted sequence of scans (~ 1.7 against ~ 3.5 nm after 11 scans). Secondly, random deviations from the linear growth of the width values during individual scans arise more often. Thus, a consecutive scanning increases the growth

of the values and stabilizes it. However, the growth is not proportional to the number of scans: 25x magnification of their number only doubles the width value growth in the case of the consecutive scans.

The character of variation of the width values on a number of scans changes, if instead of interruption of scanning with a withdrawal of a plate from vacuum we have pauses in scanning in vacuum. Fig. 4 presents, how the variation of the width values on the number of scans changes depending on the way of suspension of scanning. The first 150 scans were done with pauses of 5 min. after 25, 50, 75, etc. scans (stage 1) in a vacuum chamber. After stage 1 the plate was taken out in the atmosphere for several months. Consecutive scans 151...200 of the same ledge were done with one vacuum pause (after 175 scans, stage 2). After that stage the plate was again taken out from SEM. Stage 3 was continued by ten uninterrupted scans.

It is visible, what even a prolonged (150 scans) scanning with pauses practically does not change the width value. Appreciable changes of the sizes arise only after the atmospheric interruptions of scanning. (In the first scans the absence of a peak we explained by a random value of VS amplitude).

We should also note the presence of the local peaks of values against the noise background at the first stage, and also at the second stage with the amplitude of ~0.5 nm after each vacuum pause in scanning.

We also recorded a similar character of a variation of the width values for the modified ledge profile with roundings at the TB borders (formed by means of a mask of another type). Such a character of the variation of the width values was also recorded for the ledge formed in a polysilicon layer (Fig. 5).

Thus, the physical processes causing the discovered character of the variation of sizes are common for all the investigated ledges.

Discussion

Basic possibility of reduction of the width values of a ledge as a result of its scanning in SEM was demonstrated in a modeling experiment [1]. In [1] a calculation of VS curve in SEM was done with the use of the model of emission of the slow secondary electrons (SSE) from the ledge, the dielectric surface of which was charged as a result of scanning of it by an electron beam. The emission model was realized by calculation of the scattering of the falling beam of electrons in the material of the ledge and the substrate, calculation of the charged surface layer, calculation of generation of the scattered electrons and SSE emitted from the surface, by the method of Mont Carlo. The geometrical model of the ledge corresponded to the ledge in PMMA layer (electron resist), located on the silicon substrate with a sublayer of oxide or without it. The height of the ledge was 750 nm, the width — 250 nm,

and the inclination of the lateral walls — 2°. The scanning parameters were close to the corresponding ones in our experiment: energy of electrons was 1.5 keV, current — 10 pA.

As a result of the modeling it was found out, that electric charges were induced in PMMA surface layer. The density of the charges and their signs were distributed non-uniformly along the surface: the central part of TB appeared to be charged negatively, the TB sites adjoining to its borders and also parts of the lateral walls adjoining to latter ones were charged positively.

Such a distribution of charges along the surface introduced changes in the spatial density of SSE emission from the angular sites of the ledge and changed the profile of VS curve from TB corners. As a result the peaks of VS curve were shifted to the middle of the ledge and the distance between its points, by which the width value of the ledge was measured, decreased. Reduction of the width value appeared to be dependent on the energy of the electrons in the falling beam, the width and the height of the ledges, on the angle of inclination of its lateral walls, on affinity of the neighbouring ledges and on the number of scanings. The range of the reduction of the width was from 1 up to 11 nm. Variation of the conditions of scanning and parameters of the ledge did not lead to widening of the ledge even in one single case.

In our ledges, unlike in modeling, the charges were probably induced in the surface films of the natural oxide and contamination. In case of repeated continuous scanings of the ledge the width values always decreased in the beginning, and with an increase of the number of scans they stabilized.

Those reductions of the values can be explained (as in the modeling experiment) by charging of the dielectric layers of the ledge. However, we should point out, that interruptions with a withdrawal of the sample from vacuum and a pause in scanning of the sample in vacuum in all cases led to an increase of the width values.

Thus, the reason for the complex character of the variation of the width value of the ledge, which we recorded, apparently, are the two processes occurring simultaneously: deposition of a contaminated hydrocarbon film on the surface of the ledge and electric charging of its surface layer by the beams of the falling, scattered and emitted electrons. If the first process leads only to an increase of the width values of the ledge, the second one can also reduce it, and also, apparently, increase it. We discovered that during reduction of the width values the monotonous contamination broadening was absent. Broadening (in the form of leaps of the sizes) was recorded only at the repeated scanning after the withdrawal of the plate from vacuum, after the possible relaxation of the charge induced during the previous scanning. This broadening appears, probably, because of the deposition of the contamination film. It is interesting that after exposure the plate to air in-

duced in vacuum charge leads to the bigger contamination broadening in the case of prolonged scanning the ledge than during a single scanning (compare curves in Fig. 2 and 3). Apparently, the induced charge stimulates contamination on the ledge surface in air. On the contrary the pauses (during scanning in vacuum) possibly leads only to redistribution of the charges, causing casual and small leaps (Fig. 4), but not leading to a contamination broadening.

The described picture of the processes occurring on the surface of the ledge during its scanning in a low-voltage SEM is more complex than the ideas presented about it in [4]. There it is assumed, that the deposition of a contamination film is proportional only to the dose of an electronic irradiation and depends on the character of the irradiation, which determines access of the hydrocarbonic particles to the scanned area (with account of only "external" reasons). At that, the complex "internal" phenomena occurring on the surface of the ledge during its scanning in a low-voltage SEM are just ignored.

Conclusion

The discovered variation (increase and reduction) of the sizes of the ledge width with the amplitude of several nanometers during its repeated scanning in a low-voltage SEM is caused by a complex picture of the occurring processes. We assume that there are processes of the contamination deposition of the hydrocarbonic molecules on the surface of the ledge and its electric

charging. In our opinion, the charging can influence the sedimentation of the contamination film, essentially reducing its thickness in the conditions of vacuum. We discovered an appreciable broadening of the ledge only during repeated scanings of the ledge after the withdrawal of the plate from vacuum. We believe that the induced charge can stay in the conditions of vacuum for a rather long time: five-minute pauses in scanning without a withdrawal of the sample from the vacuum, not causing a charge relaxation, did not result in a contamination broadening. The described phenomenon is revealed not only on the silicon ledges at different versions of their manufacturing, but also on the ledges in a polysilicon layer located on a dielectric film, i.e. it has a common character.

References

1. Ko Y.-U., Chung M.-S. Monte Carlo simulation of charging effects in linewidth metrology: on insulator substrate, *Scanning*, 1998, vol. 20, pp. 549–555.
2. Larionov Yu. V. Variatsiya izobrazheniya vistupa v khode ego mnogokratnogo skanirovaniya v nizkovoltnom REM, *Nano-i Mikrosistemnaya tekhnika*, 2016, no. 11, pp. 650–661.
3. Novikov Yu., Ozerin Yu. V., Plotnikov Yu. I., Rakov A. V., Todua P. A. Lineinaya mera mikrometrovogo i nanometrovo diapazonov dlya rastrovoy elektronnoy i atovno-silovoy mikroskopii // Trudi IOFAN. 2006. T. 62. C. 36–76.
4. Gavrilenko V. P., Kuzin A. Yu., Mitukhlaev V. B., Rakov A. V., Todua P. A., Filippov M. N., Sharonov V. A. Iskazeniye profilya rel'efnikh elementov na poverhnosti monokristallicheskogo kremniya v rezultate ikh kontaminatsii v nizkovoltnom rastrovom mikroskope, *Izmeritel'naya tekhnika*, 2013, no. 3, pp. 12–17.

УДК 621.38.049.77

DOI: 10.17587/nmst.19.729-736

Б. Г. Путинцев, аспирант, e-mail: putintsev@isvch.ru

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт сверхвысококачественной полупроводниковой электроники Российской академии наук (ИСВЧПЭ РАН), г. Москва

РАЗРАБОТКА ОДНОКРИСТАЛЬНЫХ ПРИЕМОПЕРЕДАЮЩИХ МОДУЛЕЙ V-ДИАПАЗОНА НА НИТРИДЕ ГАЛЛИЯ

Поступила в редакцию 01.08.2017

Представлены результаты разработки и исследований монокристаллических интегральных схем приемопередающих модулей, изготовленных по НЕМТ-технологии на основе гетероструктур нитрида галлия на сапфировых подложках, предназначенных для работы в V-диапазоне (40...75 ГГц). Измерения изготовленных образцов "системы-на-кристалле" продемонстрировали работоспособность в диапазоне 66...69 ГГц. Выходная мощность в передающем тракте составила не менее 10 дБм, диапазон перестройки гетеродина — не менее 2 ГГц. Потребляемая мощность всей МИС равна 520 мВт.

Ключевые слова: V-диапазон, нитрид галлия, НЕМТ, приемопередающий модуль, система-на-кристалле

Введение

В ИСВЧПЭ РАН ведутся работы по освоению технологии проектирования и производства монокристаллических интегральных схем (МИС) на основе гетероструктур нитрида галлия для приемопередающих

систем [1–10]. В данной работе представлены результаты исследований и разработок приемопередающих "систем-на-кристалле" V-диапазона. Ширина доступной полосы и отсутствие интерференции между различными источниками сигнала в данном диапазоне делают его привлекательным

для применения в высокоскоростной сверхширокополосной передаче данных, в системах межспутниковой связи и перспективных образцах вооружения военной и специальной техники. В миллиметровом диапазоне размеры излучателя столь малы, что целесообразно интегрировать их непосредственно на кристалл. Интеграция антенн на кристалле позволяет обеспечить низкий уровень потерь между элементами системы, низкий уровень шумов и большую передаваемую мощность [11], а также снизить производственные и материальные издержки по сравнению с реализацией приемопередающего модуля (ППМ) в виде микросборки [12].

МИС были реализованы на гетероструктурах AlGaIn/GaN на подложках сапфира толщиной 350 мкм. Изготовленные на данных гетероструктурах транзисторы с шириной затвора 2×50 мкм и длиной затвора 140 нм имеют измеренные значения предельной частоты усиления по току (F_T) 57 ГГц и предельной частоты генерации (F_{max}) 130 ГГц без исключения паразитного влияния контактных площадок (деембеддинга).

Нитрид галлия — широкозонный полупроводник, позволяющий создавать усилительные каскады с более высокой выходной мощностью по сравнению с арсенидом галлия, поэтому он наиболее востребован в усилителях мощности, обладает более высокими пробивными напряжениями, большей стойкостью к внешним воздействиям — температуре, ионизирующему излучению.

1. Разработка и изготовление МИС

Структурная схема разработанной "системы-на-кристалле" приведена на рис. 1. Генератор, управляемый напряжением (ГУН), с буферным усилителем выполняют роль источника сигнала V-диапазона, поступающего на передающую антенну, а

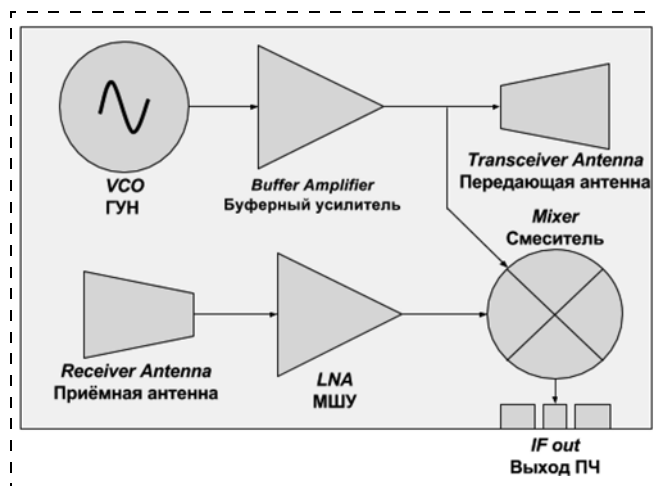


Рис. 1. Структурная схема МИС ППМ V-диапазона
Fig. 1. Block diagram of MIC TRM of the V-range

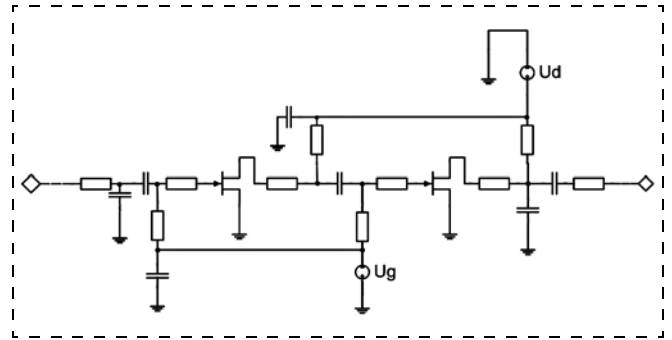


Рис. 2. Принципиальная схема МШУ
Fig. 2. Basic circuit of LNA

также роль гетеродина. В смесителе сигнал гетеродина и принятый сигнал с приемной антенны, усиленный малошумящим усилителем (МШУ), преобразуются в сигнал промежуточной частоты.

На начальном этапе было проведено схемотехническое моделирование элементов "системы-на-кристалле", в котором были использованы модели транзисторов, построенные на основе измерений S -параметров и вольт-амперных характеристик изготовленных ранее тестовых транзисторов.

Принципиальная схема разработанного однокаскадного МШУ показана на рис. 2. Входная и выходная согласующие цепи образованы конденсаторами и микрополосковыми линиями. Согласование входа выполнялось на достижение минимального уровня шума. Коэффициент усиления МШУ — 10 дБ, коэффициент шума — 6,0...6,5 дБ [13–16].

В качестве интегрированного в ППМ источника сигнала был реализован ГУН V-диапазона (схема приведена на рис. 3). Микрополосковые линии T_s и T_g , подключенные к истоку и затвору транзистора, вместе с варактором образуют резонансный контур. На стоке образуется отрицательное дифференциальное выходное сопротивление. Частота генерации определяется в основном длиной линий T_s и T_g и емкостями транзистора [17]. Управление частотой генерации осуществляется варактором, в качестве которого используется транзистор в диодном включении — управляющее напряжение меняет емкость затвор—сток. На выход ГУН подключен однокаскадный буферный усилитель для устранения влияния вариации цепи нагрузки генератора на частоту и уровень формируемого в ГУН сигнала. Номинал разделительных конденсаторов в цепях питания и смещения выбран достаточно большим, чтобы не оказывать влияния на резонансную частоту. При расчетах схемы была использована нелинейная модель транзисторов с шириной затвора 100 мкм, построенная на основе результатов измерений тестовых транзисторов [18].

Смеситель построен из двух трансформаторов на основе связанных микрополосковых линий (мос-

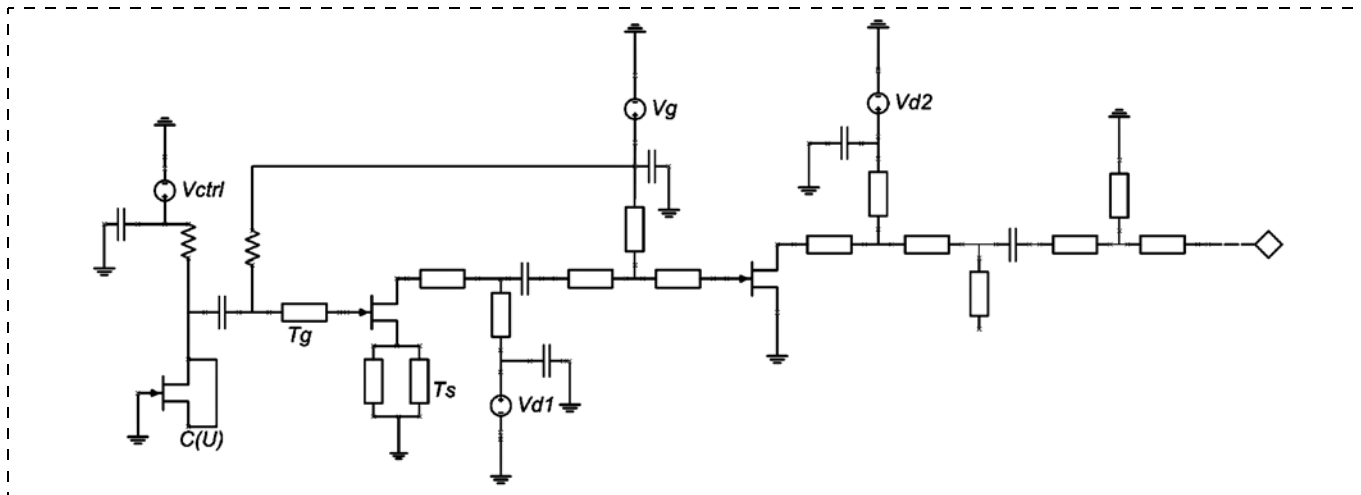


Рис. 3. Принципиальная схема ГУН

Fig. 3. Basic circuit of VCO

тов Маршанда) (принципиальная схема представлена на рис. 4). На входы мостов поступают сигналы с ГУН и антенны — на вход смесителя с ГУН подается сигнал гетеродина (LO), на вход RF — сигнал в диапазоне от 60 до 67 ГГц. На выходе мостов формируются сигналы, смещенные относительно друг друга по фазе на 180° . Выходные сигналы мостов попарно перемножаются в транзисторах, суммируются и подаются на выход (IF). Для достижения необходимой рабочей ширины полосы смесителя мосты Маршанда реализованы в виде семи отрезков связанных микрополосковых линий. Оптимизацию параметров схемы проводили в целях минимизации потерь преобразования в смесителе. Расчетные потери в балансном смесителе при преобразовании сигнала из диапазона 60...67 ГГц в диапазон 0...5 ГГц не превышают 12 дБ.

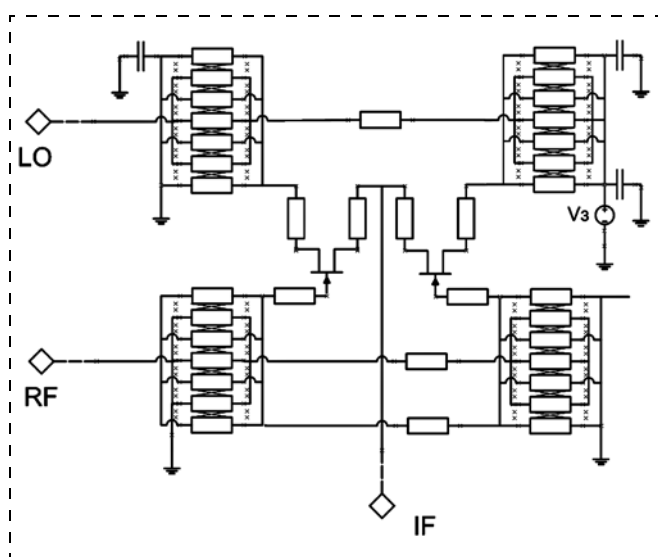


Рис. 4. Принципиальная схема смесителя

Fig. 4. Basic circuit of the mixer

По результатам схемотехнического моделирования сосредоточенные элементы схемы были преобразованы в топологический проект в САПР Keysight Advanced Design System (ADS). Для учета взаимного влияния распределенных СВЧ-элементов и оптимизации их геометрических параметров было проведено трехмерное электромагнитное моделирование полученного топологического проекта. В результате на данную МИС получено свидетельство о регистрации топологии интегральной схемы [19].

Разработанные МИС были изготовлены на технологическом оборудовании ИСВЧПЭ РАН. Травление заземляющих отверстий сквозь сапфировую подложку связано с серьезными технологическими трудностями, поэтому было использовано технологическое решение, заключающееся в создании заземляющей плоскости над слоем полимерного диэлектрика-фотолака, нанесенного на уже изготовленные СВЧ элементы. Таким образом, заземление соответствующих элементов было выполнено через отверстия в слое фотолака, одновременно играющего роль защитной пассивации [20].

Фотографии кристаллов МИС ППМ после нанесения слоев фотолака и верхней металлизации представлены на рис. 5 (см. вторую сторону обложки). Размеры "системы-на-кристалле" составляют $4,0 \times 2,4$ мм.

2. Характеристики МИС

В результате измерений нескольких образцов МИС установлено, что выходная мощность в передающем тракте варьируется от 10 до 14 дБм (рис. 6, а), при этом потребляемая мощность (P_{out}) составила 520 мВт при напряжении питания 10 В. Диапазон перестройки частоты (F_{gen}) составляет 66,5...69 ГГц при управляющем напряжении (U_{ctrl}) 0...10 В (рис. 6, б).

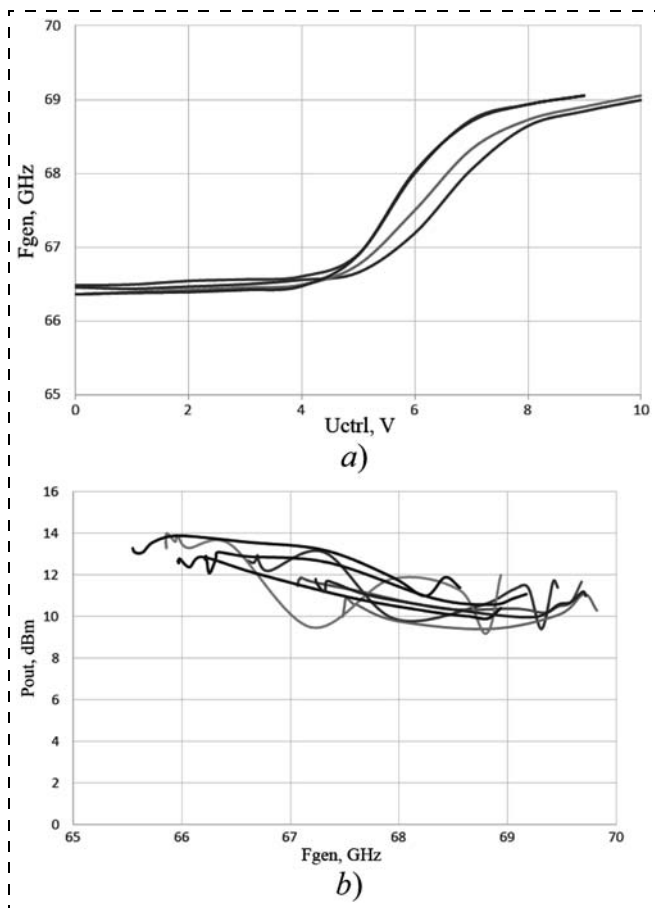


Рис. 6. Параметры МИС ГУН: *a* — зависимость частоты генерации ГУН от управляющего напряжения; *b* — зависимость выходной мощности от частоты ГУН
Fig. 6. Parameters of MIC VCO: *a* — dependence of the frequency of generation of VCO on the control voltage; *b* — dependence of the output power on the frequency of VCO

Измеренная зависимость частоты генерации от напряжения питания — около 200 МГц/В (при $U_{\text{упр}} = 10$ В). Относительное изменение частоты генерации при изменении температуры от +25 до +55 °С в постоянной рабочей точке составляет $\Delta F/F < 0,3$ %. Установлено, что можно обеспечить постоянное значение частоты генерации за счет изменения напряжения смещения транзистора. Возможно, что в данном случае именно эффект саморазогрева транзисторов, а не температура окружающей среды является определяющей причиной изменения частоты генерации ГУН [21]. Потери преобразования смесителя из *V*-диапазона в сигнал промежуточной частоты (ПЧ) 1...4 ГГц составляют –14...–12 дБ при мощности гетеродина 10 дБм.

В ходе оценки полученных результатов было проведено сравнение разработанной МИС ППМ с устройствами класса МПК N04В 1/40 [22–28] — элементами передающих систем — приемопередатчиков, т. е. устройств, где приемник и передатчик объединены в один конструктивный блок, в котором, по меньшей мере, одна часть используется для передачи и приема (см. таблицу).

Заключение

Предварительные исследования разработанной в ИСВЧПЭ РАН компактной МИС приемопередающего модуля *V*-диапазона в виде "системы-на-кристалле" с интеграцией всех элементов приемного и передающего тракта продемонстрировали ее работоспособность.

Выходная мощность в передающем тракте составила не менее 10 дБм, диапазон перестройки

Сравнение характеристик МИС приемопередающих модулей
Comparison of MIC characteristics of the transmitter-receiver modules

Наименование характеристик <i>Characteristics</i>	Изготовители МИС и источники <i>Manufacturers of MIC and the sources</i>						
	ИСВЧПЭ РАН (Россия) [данная работа] <i>ISVCHPE RAS</i> (Russia) [the given work]	University of Toronto (Канада) [22] <i>University of Toronto</i> (Canada) [22]	CEA-Leti (Франция) [23] <i>CEA-Leti</i> (France) [23]	University of Toronto (Канада) [24] <i>University of Toronto</i> (Canada) [24]	University of Melbourne (Австралия) [25] <i>University of Melbourne</i> (Australia) [25]	Toshiba (Япония) [26] <i>Toshiba</i> (Japan) [26]	Analog Devices (США) [27] <i>Analog Devices</i> (USA) [27]
Диапазон частот, ГГц <i>Frequency band, GHz</i>	66...69	55...65	61	62...64	56...64	57...64	57...64
Материал, топологические нормы <i>Technology</i>	GaN HEMT 130 нм <i>GaN</i> <i>HEMT</i> <i>130 nm</i>	Si КМОП 65 нм <i>Si</i> <i>CMOS</i> <i>65 nm</i>	Si КМОП 65 нм <i>Si</i> <i>CMOS</i> <i>65 nm</i>	SiGe БиКМОП 180 нм <i>SiGe BiCMOS</i> <i>180 nm</i>	SiGe БиКМОП 130 нм <i>SiGe Bi CMOS</i> <i>130 nm</i>	SiGe БиКМОП (н.д.) <i>SiGe</i> <i>BiCMOS</i> (n.a.)	SiGe БиКМОП (н.д.) <i>SiGe</i> <i>BiCMOS</i> (n.a.)
Потребляемая мощность, мВт <i>Power consumption, mW</i>	520	374	98	640	515	600	600
Излучаемая мощность, мВт <i>Output signal power, mW</i>	10...14	—	—	—	4	6	—
Размер, мм <i>Size, mm</i>	4,0 × 2,4	3,2 × 2,1	3,1 × 1,9	2,5 × 2,5	5 × 5	2,2 × 1,3	—
Год разработки <i>Year of development</i>	2016	2008	2013	2006	2010	2012	2014

ГУН — не менее 2 ГГц. Потребляемая мощность МИС составила 520 мВт при напряжении питания 10 В.

По совокупности характеристик разработанная МИС ППМ соответствует мировому уровню. Впервые в мире приемопередающая "система-на-кристалле" изготовлена на гетероструктурах нитрида галлия.

В перспективе характеристики МИС могут быть улучшены за счет совершенствования гетероструктур и развития технологии, а стоимость промышленного изготовления существенно снизится при переходе на подложки из полупроводникового кремния.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации (соглашение о предоставлении субсидии № 14.607.21.0087, уникальный идентификатор проекта RFMEFI60715X0087).

Список литературы

1. Мальцев П. П., Федоров Ю. В., Галиев Г. Б., Бугаев А. С., Сеничкин Д. Л. Разработка сверхвысокочастотной нанoeлектроники // Нано- и микросистемная техника. 2010. № 11. С. 14–16.
2. Мальцев П. П., Матвеев О. С., Гнатюк Д. Л., Лицкий А. П., Федоров Ю. В. Направления развития антенн диапазона 5 ГГц с минимальным объемом // Нано- и микросистемная техника. 2011. № 11. С. 45–53.
3. Мальцев П. П., Матвеев О. С., Гнатюк Д. Л., Лицкий А. П., Федоров Ю. В. Обзор реализаций планарных встроенных антенн диапазона 5 ГГц с минимальным объемом // Нано- и микросистемная техника. 2011. № 10. С. 39–46.
4. Мальцев П. П., Матвеев О. С., Гнатюк Д. Л., Лицкий А. П., Федоров Ю. В. Обзор реализаций встроенных антенн диапазона 5 ГГц с излучателем-монополюсом // Нано- и микросистемная техника. 2011. № 9. С. 34–44.
5. Мальцев П. П., Матвеев О. С., Гнатюк Д. Л., Лицкий А. П., Федоров Ю. В., Бунегина С. Л., Крапухин Д. В. Обзор реализаций планарных антенн X-диапазона с двумя слоями металлизации // Нано- и микросистемная техника. 2012. № 4. С. 45–54.
6. Мальцев П. П., Матвеев О. С., Гнатюк Д. Л., Лицкий А. П., Федоров Ю. В., Крапухин Д. В., Бунегина С. Л. Многослойные планарные антенны. Часть 1. Типы, реализации, преимущества // Нано- и микросистемная техника. 2012. № 10. С. 45–54.
7. Мальцев П. П., Матвеев О. С., Гнатюк Д. Л., Лицкий А. П., Федоров Ю. В., Крапухин Д. В., Бунегина С. Л. Многослойные планарные антенны. Часть 2. Обеспечение многочастотного режима круговой или эллиптической поляризации излучения // Нано- и микросистемная техника. 2012. № 11. С. 46–52.
8. Мальцев П. П., Гнатюк Д. Л., Федоров Ю. В., Зуев А. В., Галиев Р. Р., Побойкина Н. В. Исследование малосигнальных и шумовых характеристик метаморфных транзисторов для монолитных интегральных схем в крайне-высокочастотном диапазоне // Нано- и микросистемная техника. 2013. № 6. С. 29–31.
9. Мальцев П. П. Перспективы создания "систем-на-кристалле" для СВЧ и КВЧ диапазонов частот на арсениде галлия // Нано- и микросистемная техника. 2013. № 4. С. 40–48.
10. Федоров Ю. В., Мальцев П. П., Матвеев О. С., Гнатюк Д. Л., Крапухин Д. В., Путинцев Б. Г., Павлов А. Ю., Зуев А. В. МИС усилителей со встроенными антеннами СВЧ-диапазона на наногетероструктурах // Наноиндустрия. 2015. № 3. С. 44–51.
11. Мальцев П. П., Матвеев О. С., Федоров Ю. В., Гнатюк Д. Л., Крапухин Д. В., Зуев А. В., Бунегина С. Л. Монолитная интегральная схема усилителя со встроенной антенной для пятимиллиметрового диапазона длин волн // Нано- и микросистемная техника. 2014. № 9. С. 12–15.
12. Ваньков В. А., Земляниников Н. С., Суханов В. С. Современные технологии и подходы создания миниатюрных приемопередающих модулей // Нано- и микросистемная техника. 2014. № 6. С. 25–27.
13. Мальцев П. П., Федоров Ю. В., Гнатюк Д. Л., Матвеев О. С., Зуев А. В. Интегральный антенный элемент со встроенным усилителем для диапазона 57–64 ГГц. Свидетельство о государственной регистрации № 2015630131 от 12.12.2015.
14. Крапухин Д. В. Малошумящие усилители диапазона 60 ГГц. Обзор мировых коммерческих разработок // Нано- и микросистемная техника. 2016. № 12.
15. Крапухин Д. В., Мальцев П. П. Монолитная интегральная схема малошумящего усилителя на нитриде галлия для диапазона 57–64 ГГц // Российский технологический журнал. 2016. Т. 4, № 4.
16. Крапухин Д. В. Монолитная интегральная схема малошумящего усилителя на нитриде галлия для диапазона 57–64 ГГц: дис. ... канд. техн. наук: 05.27.01. ФГБОУ ВО Московский технологический университет, 2016.
17. Muller J.-E., Grave T., Siweris H. J. A. GaAs HEMT MMIC Chip Set for Automotive Radar Systems Fabricated by Optical Stepper Lithography // IEEE Journal of solid-state circuits. September 1997. Vol. 32, N. 9.
18. Мальцев П. П., Федоров Ю. В., Крапухин Д. В., Матвеев О. С., Путинцев Б. Г. Монолитная интегральная схема ГУН V-диапазона // Нано- и микросистемная техника. 2016. Т. 18. № 9. С. 645–650.
19. Мальцев П. П., Федоров Ю. В., Гнатюк Д. Л., Матвеев О. С., Крапухин Д. В., Путинцев Б. Г. Интегрированный приемопередающий модуль для диапазона частот 57–64 ГГц. Свидетельство о государственной регистрации топологии интегральной схемы № 2016630080 от 12.07.2016.
20. Бугаев А. С., Енюшкина Е. Н., Арутюнян С. С., Иванова Н. Е., Глинский И. А., Томаш К. Н. Разработка технологии формирования общей земли на активной поверхности монолитной интегральной схемы усилителя мощности на нитридных гетероструктурах // Материалы Международной научно-технической конференции "Фундаментальные проблемы радиоэлектронного приборостроения" (INTERMATIC — 2015), 2016.
21. Glinkii I. A., Zenchenko N. V. Computer simulation of the heat distribution element for high-power microwave transistors // Russian Microelectronics, 2015. Vol. 44, N 4. P. 236–240.
22. Tomkins A., Aroca R. A., Yamamoto T., Nicolson S. T., Doi Y., Voinigescu S. P. A Zero-IF 60GHz Transceiver in 65nm CMOS with >3.5 Gb/s Links // Custom Integrated Circuits Conference. CICC 2008. 2008.
23. Siligans A., Chaix F., Pelissier M. et al. A low power 60 GHz 2.2-Gbps UWB transceiver with integrated antennas for short range communications // IEEE Radio Frequency Integrated Circuits Symposium. 2013. P. 297–300.
24. Yao T., Tchoketch-Kebir L., Yuryevich O. et al. 65 GHz Doppler Sensor with On-Chip Antenna in 0.18 μm SiGe BiCMOS // IEEE. 2006. P. 1493–1496.

25. Chien M. Ta, Byron Wicks, Bo Yang, Yuan Mo, et al. Wireless Communications at 60 GHz: A single-chip Solution on CMOS technology // Mobile and Wireless Communications: Network layer and circuit level design. 2010. P. 281–303.

26. Mitomo T., Tsutsumi Y., Hoshino H., et al. A 2-Gb/s Throughput CMOS Transceiver Chipset With In-Package Antenna for 60-GHz Short-Range Wireless Communication // IEEE Journal of solid-state circuits. 2012. Vol. 47, No. 12, pp. 3160–3171.

27. Analog Devices, HMC6001LP711E, 60 GHz Rx with integrated antenna, Product Datasheet. URL: <http://www.analog.com/en/products/rf-microwave/integrated-transceivers-transmitters-receivers/microwave-mmwave-tx-rx/hmc6001.html> (дата обращения 24.11.2016).

28. Мальцев П. П., Бочаров Л. Ю. Характеристика состояния и хода реализации американской программы исследований и разработок в области нанотехнологий // Нано- и микросистемная техника. 2012. № 3. С. 2–9.

B. G. Putintsev, Research Engineer, e-mail: putintsev@isvch.ru

Institute of Ultra High Frequency Semiconductor Electronics (IUHFSE), Russian Academy of Sciences, Moscow, 117105, Russian Federation

Corresponding author:

Putintsev Bogdan G., Postgraduate, Institute of Ultra High Frequency Semiconductor Electronics (IUHFSE), Russian Academy of Sciences, Moscow, 117105, Russian Federation, e-mail: putintsev@isvch.ru

Design of a GaN-based Single-Chip V-band Tx/Rx Module

*Received on August 01, 2017
Accepted on September 04, 2017*

This paper presents the research and development of a V-band (40–75 GHz) Tx/Rx module single-chip monolithic microwave integrated circuit (MMIC) manufactured with GaN heterostructure HEMT technology on sapphire substrates. Measurements of the manufactured system-on-chip samples demonstrated its operability within the tuning range of 66–69 GHz band. At least 10 dBm of output power in Tx channel and 2 GHz of local oscillator (LO) tuning range is obtained. Power consumption of Tx/Rx module is 520 mW at 10 V supply voltage.

Keywords: V-band, GaN, HEMT, Tx/Rx module, system-on-chip

For citation:

Putintsev B. G. Design of a GaN-based Single-Chip V-band Tx/Rx Module, *Nano- i Mikrosistemnaya Tekhnika*, 2017, vol. 19, no. 12, pp. 729–736.

DOI: 10.17587/nmst.19.729-736

Introduction

The Institute of Ultra High Frequency Semiconductor Electronics of RAS (IUHFSE RAS) does research and development of gallium nitride based monolithic microwave integrated circuits (MMIC) manufacture technology and design techniques [1–10]. This work presents the V-band Tx/Rx systems-on-chip development results. The available bandwidth and low interference between the signal sources in V-band make it promising for use in ultra wideband high-speed data transmission, intersatellite communication systems, prospective weapons, military and special technologies. Millimeter wave antenna sizes are so small that it becomes reasonable to integrate it directly on a chip. Antenna integration provides a lower level of losses between the system elements, lower noise and higher power transmission [11]. Production costs are also decreased in comparison with system-in-package Tx/Rx module realization [12].

MIC is manufactured on AlGaIn/GaN heterostructures on 350 μm thick sapphire substrates. The process uses $2 \times 50 \mu\text{m}$ gate width of and 140 nm gate length transistors, which have the unity current gain frequency

(F_T) of 57 GHz and the maximum oscillation frequency (F_{max}) of 130 GHz without exclusion of the parasitic influence of the contact pads (de-embedding).

Gallium nitride is a wide gap semiconductor that allows us to create amplifier stages with a higher output power than on gallium arsenide, therefore, it is most widely used in the power amplifiers, also it has higher breakdown voltage and higher resistance to the external influences like high temperature and ionizing radiation.

1. Development and manufacturing of MIC

The block diagram of the developed system-on-chip is presented in Fig. 1. The voltage controlled oscillator (VCO) with a buffer amplifier play the role of a source of a transmitter signal biased to Tx antenna, and also the role of a local oscillator. The signal from local oscillator and the RF signal from Rx antenna, amplified by a low-noise amplifier (LNA), are transformed into the signal of intermediate frequency in the mixer.

The first step was to design the system-on-chip functional elements circuits. The transistors models were designed on the basis of S -parameters measurements and IV-curves of the manufactured test transistors.

The basic circuit of the developed one-stage LNA is shown in Fig. 2. The input and output matching circuits consist of capacitors and microstrip lines. The input matching was optimized for minimal level of noise. LNA gain is 10 dB, noise figure is 6.0...6.5 dB [13–16].

V-band VCO is used as a signal source integrated in Tx/Rx module a (Fig. 3). Microstrip lines T_s and T_g connected to the source and gate of the transistor form a resonant circuit together with the varactor — an output negative differential resistance is formed. Oscillation frequency is determined basically by the length of lines T_s and T_g and capacities of the transistor [17]. The control of the oscillation frequency is carried out by the varactor, which implemented with the transistor connected as a diode — the control voltage changed the gate-drain capacity. A one-stage buffer amplifier was connected to the output of VCO for elimination of the influence of load variations at the oscillation frequency and the level of the signal formed in VCO. The values of decoupling capacitors in the power and bias circuits was selected rather big in order to decrease its influence on the resonant frequency. A nonlinear models of 100 μm gate width transistors verified by the test transistor measurements results was used in circuit design [18].

The mixer is based on two microstrip transformers (Marchand baluns) (the basic circuit is presented in Fig. 4). The signal of the local oscillator (LO) from the VCO arrives to the LO input of the mixer, the 60...67 GHz band RF signal from RX antenna arrives to RF input of the mixer. The signals at the output of the baluns are shifted by phase of 180° in relation to each other. The LO and RF signals are multiplied in the transistors and supplied to the output (IF). In order to achieve required mixer bandwidth the Marchand baluns are realized in the form of seven coupled microstrip lines. Optimization of the circuit parameters was performed to minimize the conversion loss in the mixer. The calculated conversion loss from 60...67 GHz band to 0...5 GHz band in the balanced mixer did not exceed 12 dB.

The next step of design was to transform the circuits simulated with lumped elements into a topological project in CAD, Keysight Advanced Design System (ADS). The 3D electromagnetic simulation of the topological project was performed in order to take the mutual influence of the distributed microwave elements into account and to optimize its geometrical parameters. Integrated circuit topology is registered in Russian Federal Service for Intellectual Property [19].

The developed MIC is processed on the technological equipment of the Institute of Ultra High Frequency Semiconductor Electronics of RAS. Etching of ground vias through a sapphire substrate is a serious technological difficulty, therefore, an alternative technological solution was found — the grounding plane is created on the layer of a polymeric dielectric deposited on the al-

ready made microwave elements. Thus, grounding is made through the vias in the polymeric dielectric layer, which simultaneously played the role of a protective passivation [20].

Photos of MIC Tx/Rx module chips after deposition of the polymeric dielectric layers and the top metallization are presented in Fig. 5. The system-on-chip size is 4.0×2.4 mm.

2. Characteristics of MIC

The measurements of several MIC samples showed that the output power in the Tx pathway vary from 10 to 14 dBm (Fig. 6, a). The power consumption (P_{out}) at the supply voltage of 10 V is 520 mW. The frequency tuning range (F_{gen}) is 66.5...69 GHz at the control voltage (U_{ctrl}) of 0...10 V (Fig. 6, b).

The measured supply voltage — oscillation frequency dependence is 200 MHz/V (at $U_{ypp} = 10$ V). The oscillation frequency variation due to the temperature change from $+25$ to $+55$ $^\circ\text{C}$ in a constant bias point was $\Delta F/F < 0.3$ %. It is possible to stabilize the oscillation frequency with adjustment of transistor bias voltage. Possibly, in this case the effect of transistor self-heating, not the ambient temperature, is the factor which determines variation of VCO oscillation frequency [21]. The mixer conversion loss from V-band to IF band of 1...4 GHz is -14 ... -12 dB at the LO power of 10 dBm.

During the analysis of scientific and technical level of designed MMIC Tx/Rx modules was compared with the devices of MPK N04V 1/40 class [22–28] — elements of the transmitting systems — transceivers, i.e. the devices, in which the receiver and the transmitter are integrated in one design unit, and in which at least one part is used for transmission and reception (see table).

Conclusion

Preliminary research of the developed MMIC in IUHFSE RAS for the V-band transmitter-receiver module in system-on-chip realization with integration of all the receiving and transmitting elements demonstrated its operability.

The output power in the transmitting pathway is at least 10 dBm, the VCO oscillation frequency tuning range is at least 2 GHz. The MMIC power consumption is 520 mW at the supply voltage of 10 V.

Specifications of the developed Tx/Rx module MIC corresponded to the world level. For the first time in the world the transmitter-receiver system-on-chip with integrated antennas was made with gallium nitride heterostructure technology.

In future the MMIC specifications can be improved due to heterostructure quality improvement and technology development, while the cost of the industrial manufacturing will be essentially decreased during transition to the semi-isolating silicon substrates.

The work was done with the financial support of the Ministry of Education and Science of the Russian Federation (grant agreement № 14.607.21.0087, unique identifier of the project — RFMEFI60715X0087).

References

1. Mal'cev P. P., Fedorov Ju. V., Galiev G. B., Bugaev A. S., Senichkin D. L. Razrabotka sverhvysochastotnoj nanojelektro-niki, *Nano- i Mikrosistemnaja Tekhnika*, 2010, no. 11, pp. 14–16 (in Russian).
2. Mal'cev P. P., Matveenکو O. S., Gnatjuk D. L., Lisic-kij A. P., Fjodorov Ju. V. Napravlenija razvitija antenno diapazona 5 GGc s minimal'nym ob'emom, *Nano- i mikrosistemnaja tekhnika*, 2011, no. 11, pp. 45–53 (in Russian).
3. Mal'cev P. P., Matveenکو O. S., Gnatjuk D. L., Lisic-kij A. P., Fjodorov Ju. V. Obzor realizacij planarnyh vstroennyh antenno diapazona 5 GHz s minimal'nym ob'emom, *Nano- i Mikrosistemnaja tekhnika*, 2011, no. 10, pp. 39–46 (in Russian).
4. Mal'cev P. P., Matveenکو O. S., Gnatjuk D. L., Lisic-kij A. P., Fjodorov Ju. V. Obzor realizacij vstroennyh antenno diapazona 5 GHz s izluchatelem-monopolem, *Nano- i mikrosistemnaja tekhnika*, 2011, no. 9, pp. 34–44 (in Russian).
5. Mal'cev P. P., Matveenکو O. S., Gnatjuk D. L., Lisic-kij A. P., Fedorov Ju. V., Bunegina S. L., Krapuhin D. V. Obzor realizacij planarnyh antenno H-diapazona s dvumja slojami metal-lizacii, *Nano- i Mikrosistemnaja Tekhnika*, 2012, no. 4, pp. 45–54. (in Russian).
6. Mal'cev P. P., Matveenکو O. S., Gnatjuk D. L., Lisic-kij A. P., Fjodorov Ju. V., Krapuhin D. V., Bunegina S. L. Mnogoslojnye planarnye antenno. Chast' 1. Tipy, realizacii, pre-imushhestva, *Nano- i Mikrosistemnaja Tekhnika*, 2012, no. 10, pp. 45–54 (in Russian).
7. Mal'cev P. P., Matveenکو O. S., Gnatjuk D. L., Lisic-kij A. P., Fedorov Ju. V., Krapuhin D. V., Bunegina S. L. Mnog-oslojnye planarnye antenno. Chast' 2. Obespechenie mnogochas-totnogo rezhima krugovoj ili jellipticheskoj poljarizacii izluchen-ija, *Nano- i Mikrosistemnaja Tekhnika*, 2012, no. 11, pp. 46–52 (in Russian).
8. Mal'cev P. P., Gnatjuk D. L., Fjodorov Ju. V., Zuev A. V., Galiev R. R., Pobjokina N. V. Issledovanie malosignal'nyh i shu-movyh harakteristik metamorfnyh tranzistorov dlja monolitnyh integral'nyh shem v krajnevysokochastotnom diapazone, *Nano- i Mikrosistemnaja Tekhnika*, 2013, no. 6, pp. 29–31 (in Russian).
9. Mal'cev P. P. Perspektivy sozdaniya sistem-na-kristalle dlja SVCh i KVCh diapazonov chastot na arsenide gallija, *Nano- i Mikrosistemnaja Tekhnika*, 2013, no. 4, pp. 40–48 (in Russian).
10. Fedorov Ju. V., Mal'cev P. P., Matveenکو O. S., Gna-tjuk D. L., Krapuhin D. V., Putincev B. G., Pavlov A. Ju., Zuev A. V. MIS usilitelej so vstroennymi antennami SVCh-dia-pazona na nanogeterostrukturah, *Nanoindustrija*, 2015, no. 3, pp. 44–51 (in Russian).
11. Mal'cev P. P., Matveenکو O. S., Fjodorov Ju. V., Gna-tjuk D. L., Krapuhin D. V., Zuev A. V., Bunegina S. L. Mono-litnaja integral'naja shema usilitelja so vstroennoj antennoj dlja pjatimillimetrovogo diapazona dlin voln., *Nano- i Mikrosistem-naja Tekhnika*, 2014, no. 9, pp. 12–15 (in Russian).
12. Van'kov V. A., Zemljannikov N. S., Suhanov V. S. Sovre-mennye tehnologii i podhody sozdaniya miniatjurnyh priemop-eredajushhih modulej, *Nano- i Mikrosistemnaja Tekhnika*, 2014, no. 6, pp. 25–27 (in Russian).
13. Mal'cev P. P., Fedorov Ju. V., Gnatjuk D. L., Matveen-ko O. S., Zuev A. V. Integral'nyj antennoj element so vstroen-nym usilitelem dlja diapazona 57–64 GHz, Svidetel'stvo o gos-udarstvennoj registracii № 2015630131 ot 12.12.2015 (russian)
14. Krapuhin D. V. Maloshumjashhie usiliteli diapazona 60 GHz. Obzor mirovyh kommercheskih razrabotok, *Nano- i Mikrosistemnaja Tekhnika*, no. 12, 2016 (in Russian).
15. Krapuhin D. V., Mal'cev P. P. Monolitnaja integral'naja shema maloshumjashhego usilitelja na nitride gallija dlja diapa-zona 57–64 GHz, *Rossijskij tehnologicheskij zhurnal*, vol. 4, no. 4, 2016 (in Russian).
16. Krapuhin D. V. Monolitnaja integral'naja shema ma-loshumjashhego usilitelja na nitride gallija dlja diapazona 57–64 GHz: diss. kand. tekhn. nauk: 05.27.01. Mesto zashhity: FGBOU VO Moskovskij tehnologicheskij universitet], 2016 (in Russian).
17. Muller J.-E., Grave T., Siweris H. J. A GaAs HEMT MMIC Chip Set for Automotive Radar Systems Fabricated by Optical Stepper Lithography, *IEEE Journal of solid-state circuits*, September 1997, vol. 32, no. 9 (in Russian).
18. Mal'cev P. P., Fedorov Ju. V., Krapuhin D. V., Matveen-ko O. S., Putincev B. G. Monolitnaja integral'naja shema GUN V-diapazona, *Nano- i Mikrosistemnaja Tekhnika*, 2016, no. 7 (in Russian).
19. Mal'cev P. P., Fedorov Ju. V., Gnatjuk D. L., Matveen-ko O. S., Krapuhin D. V., Putincev B. G. Integrirovannyj priemo-peredajushhij modul' dlja diapazona chastot 57–64 GHz, svidetel'stvo o gosudarstvennoj registracii topologii integral'noj shemy № 2016630080 ot 12.07.2016 (in Russian).
20. Bugaev A. S., Enjushkina E. N., Arutjunjan S. S., Ivano-va N. E., Glinskij I. A., Tomosh K. N. Razrabotka tehnologii formirovanija obshhej zemli na aktivnoj poverhnosti monolitnoj integral'noj shemy usilitelja moshhnosti na nitridnyh geterostruk-turah, *Materialy Mezhdunarodnoj nauchno-tehnicheskoi konferen-cii Fundamental'nye problemy radiojelektroonnogo priborostroenija* (INTERMATIC — 2015), 2016 (in Russian).
21. Glinskij I. A., Zenchenko N. V. Computer simulation of the heat distribution element for high-power microwave transis-tors., *Russian Microelectronics*, 2015, vol. 44, no. 4, pp. 236–240 (in Russian).
22. Tomkins A., Aroca R. A., Yamamoto T., Nicolson S. T., Doi Y., Voinigescu S. P. A Zero-IF 60GHz Transceiver in 65nm CMOS with > 3.5 Gb/s Links, *Custom Integrated Circuits Con-ference*. (CICC 2008), 2008.
23. Siligans A., Chaix F., Pelissier M. et al. A low power 60-GHz 2.2-Gbps UWB transceiver with integrated antennas for short range communications, *IEEE Radio Frequency Integrated Circuits Symposium*, 2013, pp. 297–300.
24. Yao T., Tchoketch-Kebir L., Yuryevich O. et al. 65 GHz Doppler Sensor with On-Chip Antenna in 0.18 μm SiGe BiCMOS, *IEEE*, 2006, pp. 1493–1496.
25. Chien M. Ta, Byron Wicks, Bo Yang, Yuan Mo et al. Wireless Communications at 60 Ghz: A single-chip Solution on CMOS technology, *Mobile and Wireless Communications: Net-work layer and circuit level design*, 2010. P. 281–303.
26. Mitomo T., Tsutsumi Y., Hoshino H. et al. A 2-GB/s Throughput CMOS Transceiver Chipset With In-Package An-tenna for 60-GHz Short-Range Wireless Communication, *IEEE Journal of solid-state circuits*, 2012, vol. 47, no. 12, pp. 3160–3171.
27. Analog Devices, HMC6001LP711E, 60 GHz Rx with in-tegrated antenna, Product Datasheet. URL: <http://www.ana-log.com/en/products/rf-microwave/integrated-transceivers-trans-mitters-receivers/microwave-mmwave-tx-rx/hmc6001.html>.
28. Mal'cev P. P., Bocharov L. Ju. Harakteristika sostojanija i hoda realizacii amerikanskoj programmy issledovanij i razrabotok v oblasti nanotehnologij, *Nano- i Mikrosistemnaja Tekhnika*, 2012, no. 3, pp. 2–9 (in Russian).

УДК 621.382

DOI: 10.17587/nmst.19.737-744

Н. В. Масальский, канд. физ.-мат. наук, зав. сектором, e-mail: volkov@niisi.ras.ru
Федеральный научный центр Научно-исследовательский институт системных исследований
Российской Академии наук, г. Москва

ШИРОКОПОЛОСНЫЙ ФОТОННЫЙ ФАЗОВЫЙ МОДУЛЯТОР НА СТРУКТУРЕ "КРЕМНИЙ НА ИЗОЛЯТОРЕ"

Поступила в редакцию 19.06.2017

Обсуждается метод оптимизации топологических параметров субмикронного фотонного фазового модулятора, выполненного на структуре "кремний на изоляторе" для реализации широкополосной оптической модуляции. Определены значения основных параметров устройства для реализации широкополосной модуляции с высокой эффективностью в полосе примерно 200 ГГц.

Ключевые слова: кремниевая фотоника, технология "кремний на изоляторе", одномодовый гребенчатый волновод, широкополосная модуляция, численная оптимизация

Введение

Фотонный фазовый модулятор (ФМ) на структуре "кремний на изоляторе" (КНИ) [1–4] является основным элементом при реализации методов модуляции оптического пучка, предназначенных для развития технологий создания оптических сетей связи и высокопроизводительных вычислительных систем с применением оптических узлов и компонентов. Это связано с тем, что широкополосность таких систем можно использовать только при применении таких же широкополосных модуляторов, предназначенных для ввода информационного сигнала в оптический пучок. Фотонный КНИ ФМ основан на дисперсионном эффекте, связанном со свободными плазмонами [2], когда приложенное к устройству напряжение вызывает изменение показателя преломления волновода и является удачным примером сочетания оптических волноводных технологий и полупроводниковой КНИ-технологии, что открывает возможность реализации высокоэффективной широкополосной оптической модуляции [1–4]. Структурная схема КНИ ФМ, выполненного на основе гребенчатого волновода, представлена на рис. 1.

На высоколегированной рабочей области 2 кристаллического кремния n -типа с толщиной H_0 размещена в форме ребра с высотой h и шириной W область 4 поликристаллического кремния

p -типа. Эти два элемента формируют гребенчатый оптический волновод (его максимальная высота $H = H_0 + h$), по которому оптический пучок рас-

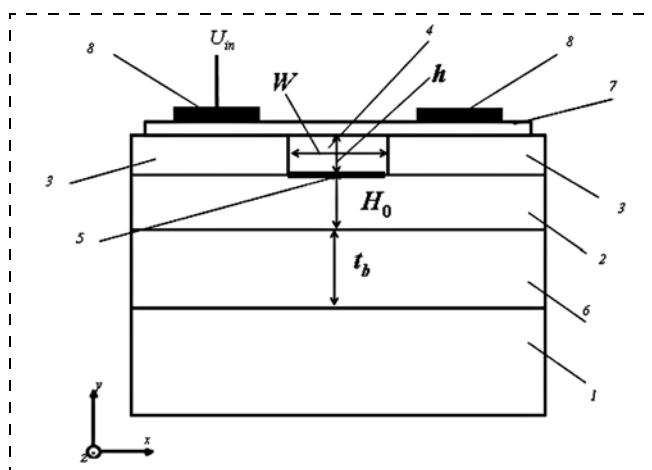


Рис. 1. Схема фотонного КНИ ФМ: 1 — кремневая подложка; 2 — область кремния n -типа; 3 — области оксида кремния для обеспечения оптического ограничения; 4 — область кремния p -типа; 5 — затвор из тонкого слоя оксида кремния толщиной t_{ox} ; 6 — погруженный оксид кремния; 7 — область поликремния для обеспечения оптического ограничения; 8 — металлические контактные площадки

Fig. 1. Block diagram of photon SOI PM: 1 — silicon substrate; 2 — silicon of n -type; 3 — silicon oxide necessary to ensure an optical limitation; 4 — silicon of p -type; 5 — gate from a thin layer of silicon oxide with thickness t_{ox} ; 6 — submerged silicon oxide; 7 — polysilicon necessary to ensure an optical limitation; 8 — metal contact platforms

пространяется вдоль оси z . Между компонентами 2 и 4 расположен затвор 5 из тонкого слоя оксида кремния. Рабочая область отделена от подложки толстым слоем погруженного оксида 6. Оксидные элементы 3 по обе стороны от ребра поддерживают горизонтальное оптическое ограничение и препятствуют тому, чтобы оптическое поле проникло в металлические контактные площадки 8. Вертикальное оптическое ограничение обеспечивается погруженным оксидом и покрытием 7 из поликристаллического кремния.

Физические основы функционирования КНИ ФМ достаточно подробно изложены в литературе [1–3]. Поэтому отметим, что один из основных параметров данного устройства — полоса модуляции — напрямую связана с его емкостью. Уменьшение емкостей служит основой для повышения скоростных возможностей приборов, выполненных по КНИ-технологии, которое можно реализовать несколькими способами.

В данной работе рассматривается один из возможных способов, связанный с одновременным масштабированием поперечных геометрических размеров волновода и увеличением концентрации легирования с контролем напряженности электрического поля на затворе при постоянном управляющем напряжении U_{in} . На основе компьютерного моделирования ищутся такие значения отмеченных выше параметров КНИ ФМ, при которых потенциально возможно реализовать высокоэффективную фазовую модуляцию с полосой модуляции порядка 200 ГГц.

Модель оптимизации

Полоса модуляции КНИ ФМ напрямую определяется динамическими характеристиками устройства, в частности, параметрами переходного процесса (ПП). Для расчета полосы необходимо вычислить временную зависимость плотности индуцированного заряда на границе затвор 5 — области 2 и 4. Во время ПП происходит изменение зарядов, что требует затрат времени. При этом если уменьшить емкость модулятора, например, за счет масштабирования его топологии и сохранить его переключающие свойства за счет дополнительного легирования, то в результате уменьшается время переключения. Следовательно, можно достичь одновременно повышения быстродействия и эффективности модуляции.

Изменение емкости модулятора при дополнительном легировании можно оценить следующим выражением:

$$C = C_0 - k_C \left(1 + \eta + \frac{\eta^2}{2} \right) \Delta N_D \frac{q \varepsilon_0 \varepsilon_{Si}}{2 U_{eff}}, \quad (1)$$

где C_0 — базовое значение емкости устройства; k_C — подгоночный параметр, зависящий от топологии модулятора; ε_0 — вакуумная диэлектрическая проницаемость; ε_{Si} — диэлектрическая проницаемость кремния; ΔN_D — приращение концентрации доноров; η — доля концентрации доноров N_D в концентрации акцепторов; $U_{eff} = U_{in} - U_T - U_{FB}$ — эффективное управляющее напряжение; U_{FB} — напряжение плоских зон; U_T — тепловой потенциал.

При выборе концентраций двух типов носителей необходимо учитывать их влияние на оптические свойства волноводной структуры, которые для длины волны света $\lambda_0 = 1550$ нм описываются следующими соотношениями.

$$\Delta Q_{(e,h)} = \frac{\varepsilon_0 \varepsilon_{ox}}{q t_{ox} t} U_{eff};$$

$$\Delta Q_e = 1,14 \cdot 10^{21} |\Delta n_e|;$$

$$\Delta Q_h = 2,18 \cdot 10^{21} |\Delta n_h|^{5/4};$$

$$\Delta \alpha_e = 0,12 |\Delta n_e|; \quad (2)$$

$$\Delta \alpha_h = 0,16 |\Delta n_h|^{5/4};$$

$$\Delta n = \Delta n_e + \Delta n_h + i \frac{\lambda_0}{4\pi} (\Delta \alpha_e + \Delta \alpha_h),$$

где $\Delta Q_{(e,h)}$ — изменения плотности заряда для электронов и для дырок соответственно; ε_{ox} — диэлектрическая проницаемость оксида кремния; q — заряд электрона; t — толщина зарядового слоя, сравнимая с толщиной затвора t_{ox} , которая составляет несколько нанометров; $\Delta n_{(e,h)}$ — изменения реальной части показателя преломления для электронов и дырок соответственно; $\Delta \alpha_{(e,h)}$ — дополнительное поглощение на свободных носителях.

При масштабировании нужно обязательно контролировать фазовый сдвиг. Для рабочей длины волны света его можно оценить следующим соотношением:

$$\Delta \varphi = k_\varphi U_{eff} L, \quad (3)$$

где $\Delta \varphi$ — фазовый сдвиг (в единицах π), возникающий в результате изменения управляющего напряжения U_{in} ; k_φ — подгоночный параметр фазового сдвига, учитывающий топологию и уровень легирования волноводной структуры; L — длина модулятора вдоль оси z .

Выражения (1)–(3) полностью определяют связь между основными оптическими и полупроводниковыми параметрами волноводного КНИ ФМ при произвольных приращениях действительной части показателя преломления вследствие присутствия свободных носителей. И следовательно, позволяют оценить поведение переходного откли-

ка при изменении концентрации легирования масштабируется, что в результате приводит к уменьшению постоянной времени переходного процесса. Это определяет возможность устройства осуществлять высокоскоростную модуляцию. Однако увеличение уровня концентрации легирования не может быть бесконечным, так как при некотором его значении напряженность электрического поля становится критической и наступает пробой затвора.

Представленные выше уравнения позволяют осуществить поиск оптимальных значений топологических и технологических параметров КНИ ФМ. Необходимо, чтобы данные значения удовлетворяли ряду критериев, которые следуют из физических ограничений, технологических и конструктивных требований [1, 4, 5]. Также предполагается, что требования согласования КНИ ФМ с ВЧ трактом выполнены во всем рассматриваемом частотном диапазоне.

Результаты моделирования

Моделирование частотных характеристик одно-модового волноводного КНИ ФМ осуществляется с помощью совместного решения уравнений Пуассона, уравнений непрерывности для расчета распределения носителей заряда, уравнения Максвелла, которое описывает распространение оптического пучка через гребенчатый волновод. Для моделирования распределения носителей использовался пакет моделирования Silvaco [6], оптические характеристики вычислялись методом распространяющихся пучков, реализованным в коммерческой программе VeamPROP [7].

Характер ПП в ФМ определяет временной отклик модулятора. Рассмотрим случай ПП при ступенчатом изменении управляющего напряжения U_{in} . Изменение уровня U_{in} приводит к изменению концентрации носителей относительно первоначального значения. Это изменение концентрации носителей по сравнению с базовым значением по времени преобразовано в изменение профиля показателя преломления по времени, что характеризуется соотношениями (2). Этот профиль применяется в программе VeamPROP. Изменение в эффективном показателе преломления преобразовано в изменение сдвига фаз по времени, что характеризуется уравнениями (2) и (3). Следовательно, переходное время характеризуется зависимостью изменения концентрации носителей по времени. При моделировании ПП важно учитывать статистику носителей, зависимость подвижности носителей от уровня легирования и напряженности электрического поля, а также зависимость времен жизни рекомбинации носителей от уровня легирования [8]. Учет этих физических соотношений очень

важен для моделирования и последующей экспериментальной реализации.

Ниже приведены основные электрические и оптические параметры для моделирования характеристик КНИ ФМ, параметры его волноводной структуры, которые выбраны исходя из критериев рассмотренных выше.

Физические и топологические параметры КНИ ФМ для длины волны света 1550 нм и температуры 300 К

Показатель преломления кремния	3,47
Показатель преломления оксида кремния	1,43
Базовый уровень легирования кремния, см^{-3}	$3 \cdot 10^{17}$
Подвижность электронов, $\text{см}^2 (\text{В} \cdot \text{с})^{-1}$	700,0
Подвижность дырок, $\text{см}^2 (\text{В} \cdot \text{с})^{-1}$	300,0
Коэффициент абсорбции электронов, дБ/см	7,4
Коэффициент абсорбции дырок, дБ/см	2,6
Напряжение плоских зон при базовом уровне легирования, В	0,86
Тепловой потенциал, В	0,026
L , мм	1,0
W , мкм	0,64
H , мкм	0,64
h , мкм	0,32
t_b , мкм	350,0
t_{ox} , нм	5,9
η	1,86
Максимальное управляющее напряжение, В	4,0
Напряжение пробоя при базовом уровне легирования, В	9,8.

Следует отметить, что в дальнейшем будем указывать только донорный уровень легирования.

На рис. 2 приведены результаты моделирования фазового сдвига от времени при разных уровнях легирования N_D .

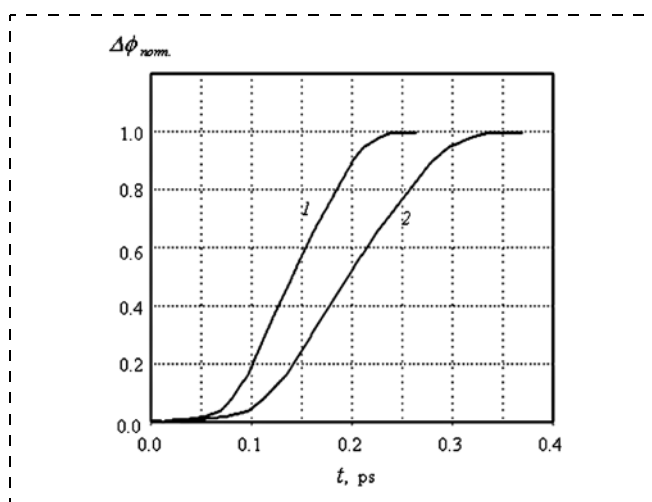


Рис. 2. Временная зависимость фазы модуляции: 1 — прототип с концентрацией легирования $2,7 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$; 2 — прототип с концентрацией легирования $1,5 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$

Fig. 2. Time dependence of the modulation phase: 1 — a prototype with the concentration of alloying of $2,7 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$; 2 — a prototype with the concentration of alloying of $1,5 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$

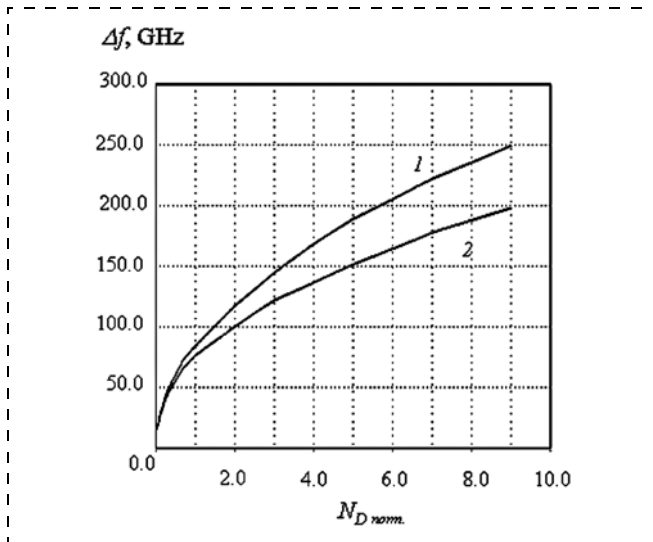


Рис. 3. Зависимость полосы пропускания от концентрации: 1 — идеальная характеристика; 2 — с учетом физических ограничений. Концентрация нормирована относительно $3 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$

Fig. 3. Dependence of the pass-band on the concentration: 1 — an ideal characteristic; 2 — with account of the physical limitations. The concentration is normalized in relation to $3 \cdot 10^{17} \text{ cm}^{-3}$

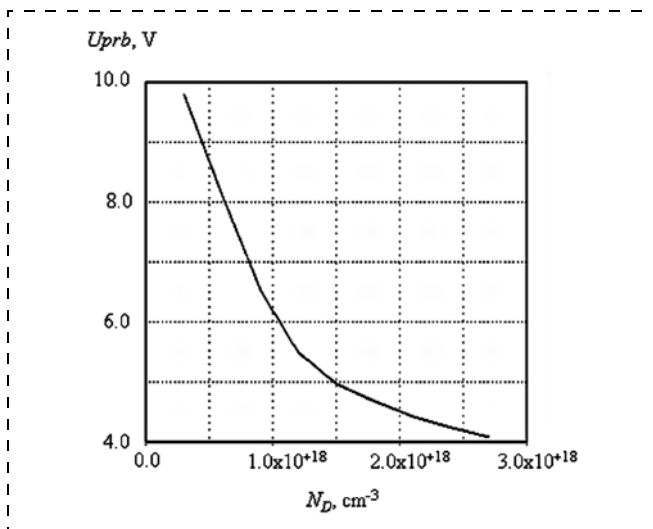


Рис. 4. Зависимость U_{prb} от N_D

Fig. 4. Dependence of U_{prb} on N_D

Как следует из результатов расчетов, время достижения максимального фазового сдвига примерно в полтора раза больше для случая с уровнем легирования $1,5 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$.

С учетом вышеупомянутых ограничений рассчитана полоса модуляции по уровню 3 дБ в зависимости от уровня легирования. Результаты моделирования приведены на рис. 3. Как и в случае временной зависимости фазового сдвига, учет физических особенностей поведения носителей при высоких уровнях легирования существенно отражается на ширине полосы модуляции. Например,

для исследуемого образца при уровне легирования $2,7 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$ расчетная полоса пропускания будет составлять без учета ограничений 250 ГГц, а с учетом — 198 ГГц. Следует отметить, что при уровнях легирования ниже $1 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$ различия в характеристиках незначительны, и отмеченные выше транспортные особенности носителей не играют существенной роли.

Дальнейшее повышение концентрации в выбранной конфигурации модулятора приводит к пробое затвора, поскольку напряжение пробоя U_{prb} достигает критического уровня, т. е. становится равным управляющему напряжению, при котором фазовый сдвиг не достигает заданного значения. На рис. 4 приведена зависимость $U_{prb}(N_D)$ для фиксированной толщины затвора 5,9 нм.

Немаловажным ограничительным фактором является амплитуда переходного тока. Ее рост приводит к дополнительным тепловым потерям, что необходимо учитывать при экспериментальной реализации. По результатам моделирования при уменьшении длительности импульса U_{in} максимальная амплитуда переходного тока существенно возрастает. Например, при минимально возможной длительности входного импульса (идеальный случай) максимальное значение амплитуды переходного тока составляет 0,94 А при напряжении $U_{in} = 3,9 \text{ В}$. При увеличении длительности входного импульса в 2 раза значение максимальной амплитуды снижается более чем в 3 раза. При дальнейшем увеличении длительности импульса U_{in} амплитуда переходного тока плавно снижается.

Заключение

Рассмотрен метод оптимизации топологических параметров субмикронного фотонного фазового модулятора, выполненного на структуре "кремний на изоляторе" для реализации широкополосной оптической модуляции. Предложенный подход базируется на одновременном масштабировании поперечных геометрических размеров волноводной структуры модулятора и увеличении концентрации легирования с контролем напряженности электрического поля на затворе при постоянном управляющем напряжении. Численное моделирование выполнено с учетом технологических ограничений стандартного технологического процесса "кремний на изоляторе" с топологическими нормами 0,5 мкм.

Определены параметры фотонного устройства для реализации широкополосной модуляции с высокой эффективностью в полосе примерно 200 ГГц.

Список литературы

1. Soref R. The past, present, and future of silicon photonics // IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron. 2006. Vol. 12. P. 1678—1687.

2. Salib M., Liao L., Jones R., Morse M., Liu A., Samara-Rubio D., Alduino D., Paniccia M. Silicon Photonics // Intel Technology Journal. 2004. Vol. 8. P. 143–160.

3. Ahn J., Fiorentino M., Beausoleil R. G., Binkert N., Davis A., Fattal D., Jouppi N. P., McLaren M., Santori C. M., Schreiber R. S., Spillane S. M., Vantrease D., Xu Q. Devices and architectures for photonic chipscale integration // App. Phys. A. 2009. Vol. 95. P. 989–997.

4. Масальский Н. В. Характеристики субмикронного фотонного фазового модулятора на структуре "кремний на изоляторе" // Нано- и микросистемная техника. 2013. № 10. С. 38–42.

5. Bogaerts W., Baets R., Dumon P., Wiaux V., Beckx S., Taillaert D., Luyssaert B., Campenhout J., Bienstman P., Thourhout D. Nanophotonic waveguides in silicon-on-insulator fabricated with CMOS technology // IEEE J. of Lightwave Technology. 2005. Vol. 23. P. 401–412.

6. Silvaco International, 4701 Patrick Henry drive, Bldg 1, Santa Clara, CA 94054, URL: <http://www.silvaco.com>

7. Rsoft Photonic CAD Suite by RSoft Design Group, Inc. URL: <http://www.rsoftdesign.com>

8. Зи С. Физика полупроводниковых приборов. М.: Мир, 1984.

N. V. Masalsky, Chief of Chair, volkov@niisi.ras.ru,
Federal state institution Federal scientific center Scientific-research institute of system achievement
of the Russian Academy of Sciences, Moscow, 117218, Russian Federation

Corresponding author:

Masalsky Nikolay V., Chief of Chair, Federal state institution Federal scientific center Scientific-research institute
of system achievement of the Russian Academy of Sciences, Moscow, 117218, Russian Federation
e-mail: volkov@niisi.ras.ru

The Broadband Photon Phase Modulator ON Structure "Silicon on Insulator"

Received on June 19, 2017

Accepted on @, 2017

The method for optimization of topological parameters of the submicronic photon phase modulator executed on structure "silicon on insulator" for implementation of wideband optical modulation is discussed. The offered approach is based on simultaneous scaling of the cross geometrical sizes of the waveguide structure of the modulator and increase in concentration of an alloying with monitoring of electric field intensity on a gate in case of constant control voltage.

For simulation of the photon phase modulator characteristics the joint solution of the connected Poisson equations and a continuity which describe transport of charge carriers in a semiconductor part of the modulator, and a Maxwell's equation which describes distribution of an optical beam through a single mode optical waveguide is used.

Numerical optimization is performed taking into account technological limits on conventional technological process "silicon on insulator" with topological norms of 0.5 microns.

The photon unit parameters for implementation of wideband modulation with high performance in a band about 200 GHz are defined.

Keywords: silicon photonics, silicon on insulator technology, the single-mode waveguide, wideband modulation, numerical optimization

For citation:

Masalsky N. V. The Broadband Photon Phase Modulator ON Structure "Silicon on Insulator", *Nano- i Mikrosistemnaya Tekhnika*, 2017, vol. 19, no. 12, pp. 737–744.

DOI: 10.17587/nmst.19.737-744

Introduction

Photon phase modulator (PM) on "silicon on insulator" (SOI) structure [1–4] is the basic element for the methods of modulation of an optical beam, intended for development of the technologies for the optical communication networks and high-efficiency computing systems with application of the optical nodes and components. This is connected with the fact that the systems' broadbandness can be used only for application of the same kind of broadband modulators for input of information signal into an optical beam. The photon SOI PM is based on the dispersive effect connected with free plasmons [2], when the voltage applied

to a device causes a change of the waveguide refractive index, and is a good example of a combination of the optical waveguide technologies and the semi-conductor SOI technology, which opens opportunities for realization of a highly effective broadband optical modulation [1–4]. Block diagram of SOI PM based on a ridge waveguide is presented in fig. 1.

On high-alloy working area 2 of the crystal silicon of n -type with thickness H_0 the area 4 of the polycrystalline silicon of p -type in the form of a rib with height h and width W is located. These two elements form a ridge optical waveguide (its maximum height is $H = H_0 + h$), via which the optical beam is propagated

along axis z . Between components 2 and 4 the gate 5 of a thin layer of silicon oxide is located. The working area is separated from the substrate by a thick layer of submerged oxide 6. The oxide elements 3 on either side of the rib support the horizontal optical limit and prevent penetration of the optical field into the metal contact platforms 8. The vertical optical limit is ensured by the submerged oxide and covering 7 of the polycrystalline silicon.

The physical foundations for functioning of SOI PM are described enough in literature [1–3]. Therefore, we will point out, that one of the key parameters of the given device — the modulation strip — is connected directly with its capacity. Reduction of the capacities forms a basis for an increase of the high-speed potentials of the devices made by SOI technology, which can be realized in several ways.

In the given work we consider one of the possible ways, connected with a simultaneous scaling of the cross-section geometrical sizes of a waveguide and increase of concentration of alloying with control of the intensity of the electric field on the gate at a constant control voltage U_{in} . On the basis of computer modeling such values of the above mentioned parameters of SOI PM are searched for, which potentially make it possible to realize a highly efficient phase modulation with a modulation strip of about 200 GHz.

Optimization model

The modulation strip of SOI PM is determined directly by the device's dynamic characteristics, in particular, by the parameters of the transient process (TP). For calculation of the strip it is necessary to calculate the time dependence of the density of the induced charge on the border of the gate 5 — areas 2 and 4. During TP a variation of charges occurs, which demands time. If we reduce the modulator capacity, for example, at the expense of scaling of its topology, and preserve its switching properties due to additional alloying, as a result the switching time will be decreased. Hence, it is possible to reach simultaneously an increase of the speed and of the efficiency of the modulation.

The variation of the capacity of the modulator due to additional alloying can be estimated by the following expression:

$$C = C_0 - k_C \left(1 + \eta + \frac{\eta^2}{2} \right) \Delta N_D \frac{q \varepsilon_0 \varepsilon_{Si}}{2 U_{eff}}, \quad (1)$$

where C_0 — base value of the capacity of a device, k_C — adjustable parameter depending on the topology of the modulator, ε_0 — vacuum dielectric permeability, ε_{Si} — dielectric permeability of silicon, ΔN_D — increment of the concentration of donors, η — share of the concentration of donors N_D in the concentration of acceptors; $U_{eff} = U_{in} - U_T - U_{FB}$ — effective control volt-

age, U_{FB} — voltage of the flat zones, U_T — thermal potential.

During selection of the concentrations of the two types of carriers it is necessary to consider their influence on the optical properties of the waveguide structure, which for the wavelength of light $\lambda_0 = 1550$ nm are described by the following correlations:

$$\Delta Q_{(e,h)} = \frac{\varepsilon_0 \varepsilon_{ox}}{q t_{ox} t} U_{eff};$$

$$\Delta Q_e = 1.14 \cdot 10^{21} |\Delta n_e|;$$

$$\Delta Q_h = 2.18 \cdot 10^{21} |\Delta n_h|^{5/4};$$

$$\Delta \alpha_e = 0.12 |\Delta n_e|; \quad (2)$$

$$\Delta \alpha_h = 0.16 |\Delta n_h|^{5/4};$$

$$\Delta n = \Delta n_e + \Delta n_h + i \frac{\lambda_0}{4\pi} (\Delta \alpha_e + \Delta \alpha_h),$$

where $\Delta Q_{(e,h)}$ — variation of the charge density of the electrons and holes, accordingly, ε_{ox} — dielectric permeability of the silicon oxide, q — charge of an electron, t — thickness of the charging layer, comparable with the thickness of gate t_{ox} , which is equal to several nanometers, $\Delta n_{(e,h)}$ — variation of the real part of the refraction index for the electrons and holes, accordingly, $\Delta \alpha_{(e,h)}$ — additional absorption on the free carriers.

During scaling it is necessary to control the phase shift. For the working wavelength of light it can be estimated by the following formula:

$$\Delta \varphi = k_\varphi U_{eff} L, \quad (3)$$

where $\Delta \varphi$ — phase shift (in π units), appearing as a result of variation of the control voltage U_{in} , k_φ — adjustable parameter of the phase shift taking into account the topology and level of alloying of the waveguide structure L — length of the modulator along axis z .

Expressions (1)–(3) determine completely the bond between the basic optical and semi-conductor parameters of the waveguide of SOI PM at any arbitrary increments of the actual part of the refraction index due to the presence of the free carriers. And therefore, they allow us to estimate the behavior of the transitive response at variation of the concentration of the alloying scaling, which, as a result, leads to a reduction of the time constant of the transient process. This determines the device's ability to define a high-speed modulation. However, an increase of the level of the concentration of alloying cannot be infinite, because at its certain value the intensity of the electric field becomes critical and there comes a breakdown of the gate.

The presented equations allow us to carry out a search for the optimal values of the topological and technological parameters of SOI PM. The given values

should meet a number of criteria, which follow from the physical limits, and the technological and constructional requirements [1, 4, 5]. It is also assumed, that the requirements for coordination of SOI PM with a high frequency path are implemented in the considered frequency range.

Results of modeling

Modeling of the frequency characteristics of a one-mode waveguide of SOI PM is carried out with the help of Poisson equations, continuity equations for calculation of distribution of the charge carriers, Maxwell equation, which describes the propagation of an optical beam through a ridge waveguide. For modeling of the distribution of carriers, Silvaco modeling package [6] was used, the optical characteristics were calculated by the method of propagation of beams realized in BeamPROP commercial program [7].

The character of TP in PM determines the time response of the modulator. We will consider the case of TP during a step change of the control voltage U_{in} . A change of the level of U_{in} leads to a change of the concentration of the carriers in relation to the initial value. This change of the concentration of carriers, in comparison with the base value by time, is transformed into a change of the profile of the time refraction index, which is characterized by the correlations (2). This profile is applied in the Beamprop program. Variation of the effective refraction index is transformed into a change of the time phase shift characterized by the equations (2) and (3). Hence, the transitive time is characterized by the dependence of the variation of the concentration of the carriers by time. During the TP modeling it is important to taken into account the statistics of the carriers, the dependence of the carriers' mobility on the level of alloying and the intensity of the electric field, and also the dependence of the lifetimes of the recombination of the carriers on the level of alloying [8]. The account of these physical correlations is very important for modeling and the subsequent experimental realization.

Below the basic electric and optical parameters are presented for modeling of SOI PM characteristics, the parameters of its waveguide structure, which were selected proceeding from the above described criteria.

Physical and topological SOI PM parameters for the light wavelength of 1550 nm and temperature of 300 K

Silicon refraction index	3.47
Silicon oxide refraction index	1.43
Base level of silicon alloying, cm^{-3}	$3 \cdot 10^{17}$
Mobility of electrons, $\text{cm}^2 (\text{V} \cdot \text{s})^{-1}$	700.0
Mobility of holes, $\text{cm}^2 (\text{V} \cdot \text{s})^{-1}$	300.0
Absorption factor of electrons, dB/cm	7.4
Absorption factor of holes, dB/cm	2.6
Voltage of the flat zones at the base level of alloying, dB/cm	0.86

Thermal potential, V	0.026
L , mm	1.0
W , μm	0.64
H , μm	0.64
h , μm	0.32
t_b , μm	350.0
t_{ox} , nm	5.9
η	1.86
Maximal control voltage, V	4.0
Breakdown voltage at the base level of alloying, V	9.8.

It is necessary to point out, that from here on we will specify only the donor level of alloying.

Fig. 2 presents the results of modeling of the time phase shift at different levels of alloying N_D .

As it follows from the results of calculations, the time for achievement of the maximal phase shift is approximately one and a half times more for the case with the level of alloying of $1.5 \cdot 10^{18} \text{ cm}^{-3}$.

Taking into account the aforementioned limits the modulation strip was calculated by the level of 3 dB depending on the level of alloying. The results of modeling are presented in Fig. 3. Just like in case of the time dependence of the phase shift, the account of the physical specific features of the carriers' behavior at high levels of alloying has an essential influence on the width of the modulation strip. For example, for the investigated sample at the level of alloying of $2.7 \cdot 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ the calculated pass-band will be 250 GHz without account of the limits, and 198 GHz with account of them. It is necessary to point out, that at the levels of alloying below $1 \cdot 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ the distinctions in the characteristics are insignificant, and the above transport features of the carriers do not play an essential role.

The further increase of the concentration in the selected configuration of the modulator leads to a breakdown of the gate because the breakdown voltage of U_{prb} reaches the critical level, i.e. it becomes equal to the control voltage, at which the phase shift does not reach the preset value. Fig. 4 presents the dependence of $U_{prb}(N_D)$ for the fixed thickness of the gate of 5.9 nm.

An important limiting factor is the amplitude of the transitive current. Its growth leads to additional thermal losses, which should be taken into account during an experimental realization. By the results of modeling, due to a reduction of the duration of impulse U_{in} the maximal amplitude of the transitive current increases essentially. For example, at the minimal possible duration of the entrance impulse (in an ideal case) the maximal value of the amplitude of the transitive current is 0.94 A at voltage $U_{in} = 3.9 \text{ V}$. If the duration of the entrance impulse is doubled, the value of the maximal amplitude decreases more than 3 times. In case of the further increase of the duration of impulse U_{in} the amplitude of the transitive current decreases gradually.

Conclusion

The method for optimization of the topological parameters of the submicronic photon phase modulator made on "silicon on insulator" structure for realization of a broadband optical modulation was considered. The proposed approach is based on a simultaneous scaling of the cross-section geometrical sizes of a waveguide structure of the modulator and concentration of the increase of alloying with the control of the intensity of the electric field on the gate at a constant control voltage. The numerical modeling was done with account of the technological limits of the standard "silicon on insulator" technological process with the topological norms of 0.5 micrometers.

The parameters of a photon device for realization of the broadband modulation with high efficiency in the strip of about 200 GHz were determined.

References

1. **Soref R.** The past, present, and future of silicon photonics, *IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron*, 2006, vol. 12, pp. 1678–1687.
2. **Salib M., Liao L., Jones R., Morse M., Liu A., Samara-Rubio D., Alduino D., Paniccia M.** Silicon Photonics, *Intel Technology Journal*, 2004, vol. 8, pp. 143–160.
3. **Ahn J., Fiorentino M., Beausoleil R. G., Binkert N., Davis A., Fattal D., Jouppi N. P., McLaren M., Santori C. M., Schreiber R. S., Spillane S. M., Vantrease D., Xu Q.** Devices and architectures for photonic chip-scale integration, *App. Phys. A.*, 2009, vol. 95, pp. 989–997.
4. **Masal'sky N. V.** Charakteristiki submikronnogo fotonnogo fazovogo modulatora na structure "kremniy na izolatore" (Characteristics of the submicronic photon phase modulator on structure "silicon on insulator"), *Nano- and Mikrosystems Tekhnika*, 2013, no. 10, pp. 38–42.
5. **Bogaerts W., Baets R., Dumon P., Wiaux V., Beckx S., Taillaert D., Luyssaert B., Campenhout J., Bienstman P., Thourhout D.** Nanophotonic waveguides in silicon-on-insulator fabricated with CMOS technology, *IEEE J. of Lightwave Technology*, 2005, vol. 23, pp. 401–412.
6. **Silvaco** International, URL: <http://www.silvaco.com> (data access 17.11.2016).
7. **Rsoft** Photonic CAD Suite by RSoft Design Group, Inc. URL: <http://www.rsoftdesign.com> (data access 11.02.2017).
8. **Sze S. M.** Physics of semiconductor devices, New York, Chichester, Brisbane, Toronto, Singapore: A Wiley-Interscience Publication, 1981.

УДК 621.382

DOI: 10.17587/nmst.19.744-751

А. И. Морозов, д-р физ.-мат. наук, проф., e-mail: mor-alexandr@yandex.ru
Московский физико-технический институт (государственный университет), г. Долгопрудный,
Московская область

МАГНИТОРЕЗИСТИВНАЯ ПАМЯТЬ С ЗАПИСЬЮ ЭЛЕКТРИЧЕСКИМ ПОЛЕМ НА ОСНОВЕ УПРУГОГО ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ СЛОЕВ

Поступила в редакцию 27.05.2017

Рассмотрены проблемы создания магниторезистивной памяти с записью электрическим полем (MERAM), основанной на упругом взаимодействии между электрочувствительным слоем и ферромагнитным слоем, входящим в состав магнитного туннельного соединения. Найдены ограничения на размер ячейки, связанные с существованием суперпарамагнитного порога.

Ключевые слова: магниторезистивная память, запись электрическим полем, упругое взаимодействие, сегнетоэлектрик, сегнетоэластик, ферромагнетик, магнитоупругое взаимодействие, пьезоэлектрический эффект, суперпарамагнитный порог

Введение

Увеличение емкости магниторезистивной памяти (MRAM) на основе туннельного магнетосопротивления требует масштабирования ячеек этой памяти в нанометровый диапазон размеров. Для этого необходимо существенное уменьшение энерговыделения в процессе записи информации, что возможно в случае перехода от записи с помощью спин-поляризованного тока (STT-MRAM) к записи электрическим полем. Принципы создания

такой памяти активно обсуждаются в последнее десятилетие (см. [1–4]).

Для управления с помощью электрического поля необходим диэлектрический (чтобы избежать омических потерь) электрочувствительный слой, в качестве которого может быть использована либо диэлектрическая прослойка между двумя проводящими ферромагнитными слоями, входящими в состав магнитного туннельного соединения, либо дополнительный слой, соседствующий с одним из этих ферромагнитных слоев.

На данный момент обсуждаются три главных механизма взаимодействия между ферромагнитным и электрочувствительным слоями:

- обменная связь;
- упругая связь;
- зарядовая связь.

Последняя эффективно работает только в случае сверхтонких ферромагнитных слоев, и разработка памяти на ее основе является делом будущего [5–8].

Принципы устройства памяти на основе обменного взаимодействия между ферромагнитным слоем и слоем мультиферроика BiFeO_3 рассмотрены в работах [9–12].

В данной работе обсуждается упругая связь между слоями.

1. Виды упругого взаимодействия

Существуют две разновидности памяти на основе упругого взаимодействия слоев.

1. Под действием электрического поля происходит переход электрочувствительного слоя в новое состояние, в котором он остается после исчезновения поля. Деформации электрочувствительного слоя существенно различаются в исходном и конечном состояниях. Именно эти деформации, передаваемые ферромагнитному слою, вследствие магнитоупругого взаимодействия диктуют положение оси легкого намагничивания в этом слое. Для успешной реализации подобного сценария электрочувствительный слой должен быть слоем сегнетоэлектрика-сегнетоэластика, а ферромагнитный слой должен иметь малую собственную магнитокристаллическую анизотропию или быть аморфным, чтобы наводимая деформацией магнитная анизотропия была определяющей.

2. Переориентация происходит между двумя положениями равновесия, существовавшими в отсутствие взаимодействия с электрочувствительным слоем. Под действием электрического поля возникает пьезоэлектрическая деформация электрочувствительного слоя, которая передается слою ферромагнетика. Вследствие магнитоупругого взаимодействия в нем происходит изменение энергии магнитной анизотропии [13–15] и два легких направления намагниченности становятся неэквивалентными. С ростом электрического поля один из минимумов энергии анизотропии исчезает. Намагниченность ферромагнетика становится коллинеарной оставшейся легкой оси. После снятия напряжения она не изменяет своей ориентации, а электрочувствительный слой возвращается к исходному состоянию. Смена знака напряжения приводит к замене растяжения сжатием и меняет минимумы энергии анизотропии местами: более вы-

годной становится ориентация, перпендикулярная той, которая реализовалась при растяжении.

Рассмотрим эти два вида упругого взаимодействия последовательно.

2. Упругое взаимодействие со слоем сегнетоэлектрика-сегнетоэластика

Большинство успешно реализованных разворотов вектора намагниченности ферромагнитного слоя на 90° импульсом электрического поля наблюдали при нанесении этого слоя на срез (110) электрочувствительного слоя сегнетоэлектрика-сегнетоэластика $\text{Pb}(\text{Mg}_{1/3}\text{Nb}_{2/3})_{0,68}\text{Ti}_{0,32}\text{O}_3$ (PMN-PT). В ромбоэдрической фазе этого соединения вектор спонтанной поляризации параллелен одному из восьми кристаллографических направлений типа [111] псевдокубической решетки типа перовскита. Приложение электрического поля напряженностью $E < 10^6$ В/м приводит к переполяризации образца [16–19]. Изменение ориентации вектора поляризации (за исключением разворота на 180°) сопровождается изменением направления ромбоэдрической деформации псевдокубической структуры, так как вектор поляризации коллинеарен оси третьего порядка. Вектор поляризации сохраняет свое новое направление после снятия электрического поля.

В случае среза (110) PMN-PT четыре из восьми возможных направлений вектора спонтанной поляризации лежат в плоскости среза, а четыре других — в перпендикулярной срезу плоскости ($\bar{1}\bar{1}0$) (рис. 1).

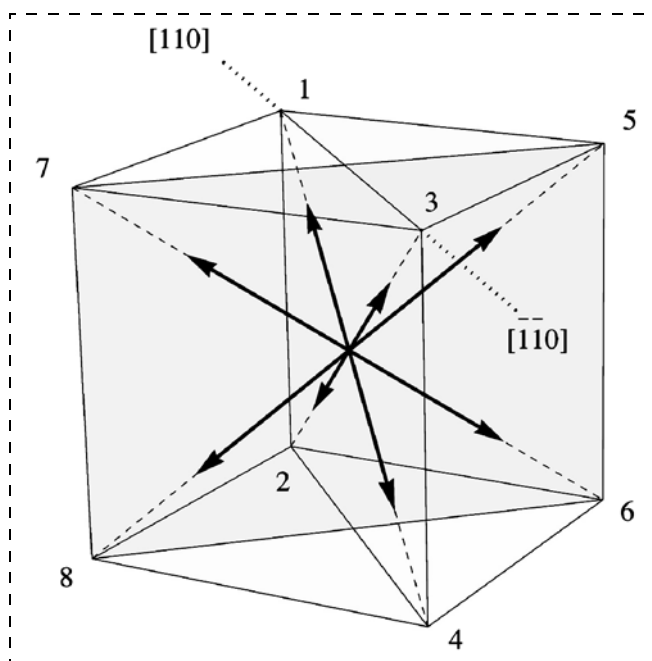


Рис. 1. Возможные направления вектора поляризации в кристалле PMN-PT.

Fig. 1. Possible directions of the polarization vector in PMN-PT crystal

Поскольку электрическое поле в указанных экспериментах было приложено перпендикулярно срезу, то при одной полярности прикладываемого напряжения равновесным состояниям вектора поляризации отвечают состояния 1 и 2 на рис. 1, а при другой полярности — состояния 3 и 4. Процесс переполяризации протекает в два этапа. Опишем его для исходного состояния 1. При приложении электрического поля в направлении $[1\bar{1}0]$ вектор поляризации разворачивается сначала на 71° и оказывается в плоскости среза (состояния 5 или 7). Затем происходит поворот на 71° в положение 3.

В состояниях 1—4 деформация, создаваемая слоем PMN-PT в ферромагнитном слое, одинакова. В случае переключения поляризации между состояниями 1 и 3 все действие подложки обусловлено сменой знака связанного заряда на границе с ферромагнитным слоем, т. е. зарядовой связью слоев [20].

Для создания двух отличающихся деформациями состояний электрочувствительного слоя необходимо, чтобы одному из них соответствовало состояние с вектором поляризации, лежащим в плоскости среза, а другому — состояние, в котором вектор поляризации лежит в плоскости, перпендикулярной срезу. То есть одному знаку прикладываемого напряжения должно соответствовать равновесное состояние (например, 1), а противоположному знаку — метастабильное состояние (например, 5). Для того, чтобы система попала в метастабильное состояние, переполяризация должна произойти не полностью, а закончиться на полпути [21].

В работах [16—19] такое переключение наблюдалось. Однако остается открытым вопрос, возможно ли в процессе долговременной эксплуатации ячейки памяти, основанной на данном принципе, избежать случаев, когда при записи информации вместо неполного происходит полное переключение. Ответ на него требует проведения дополнительных исследований.

Нанесение электродов на боковые поверхности электрочувствительного слоя решает изложенную проблему, хотя и создает дополнительные технологические трудности. Как показано в нашей работе [22], приложении электрического поля параллельно срезу (100) PMN-PT приводит к развороту вектора поляризации на 71° из состояния 1 в состояние 2 (рис. 2). Направление деформации в плоскости среза изменяется на 90° , что влечет соответствующий разворот легкой оси намагничивания в ферромагнитном слое.

В работах [16—19, 21] использовалась массивная подложка PMN-PT. Вторая проблема, возникающая при создании MERAM на основе упругого взаимодействия слоев, связана с тем, что при со-

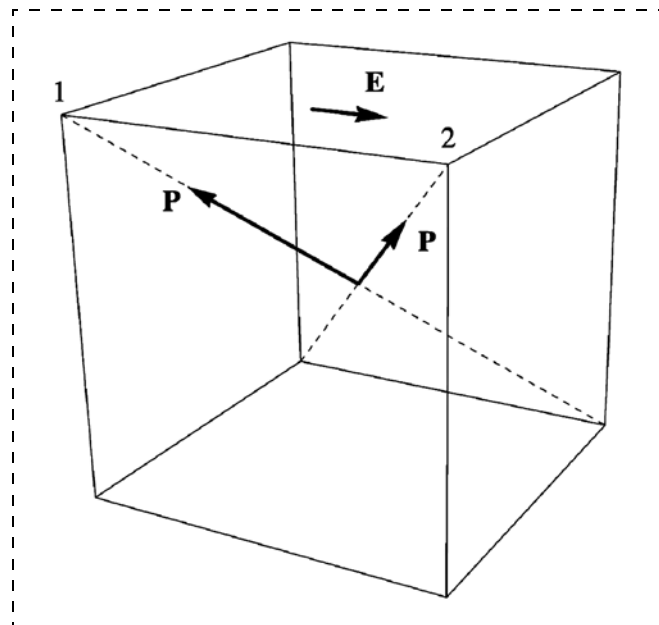


Рис. 2. Переключение вектора поляризации из положения (1) в положение (2) электрическим полем, параллельным срезу (100).
Fig. 2. Switching of the polarization vector from position (1) to position (2) by the electric field, parallel to the cut (100)

здании памяти электрочувствительный слой должен быть индивидуален для каждой ячейки, а общая подложка должна быть пассивным элементом. При этом она препятствует деформации электрочувствительного слоя под действием электрического поля. Исключить указанное действие подложки можно выбором формы электрочувствительного слоя: толщина электрочувствительного слоя должна намного превосходить его латеральный размер (память "на длинной ноге") [22]. При используемых значениях электрического напряжения $\sim 0,1$ В и полях переключения 10^5 В/м латеральный размер ячейки оказывается ограниченным сверху значением порядка сотен нанометров.

Оценим ограничения на латеральные размеры ячейки, накладываемые существованием суперпарамагнитного порога. Исходя из значения ромбоэдрического угла PMN-PT $\alpha = 89,1^\circ$ [23], легко найти, что при развороте вектора поляризации из положения 1 в положение 5 (см. рис. 1) деформация сжатия $\epsilon = -0,08$ % кубической решетки в направлении $[1\bar{1}0]$ сменяется деформацией растяжения $\epsilon = 0,08$ %. Она передается ферромагнитному слою CoFeB, наводя в нем вследствие магнитоупругого взаимодействия магнитную анизотропию с объемной плотностью энергии $K = B\epsilon \approx 10^4$ Дж/м³ (значение магнитоупругой константы $B \approx -10$ МДж/м³ взято из работ [24, 25]).

Для превышения суперпарамагнитного порога необходимо, чтобы выполнялось неравенство $KV > 50k_B T$, где V — объем ферромагнетика; k_B — постоянная Больцмана; T — температура. Нера-

венство дает значение минимального объема ферромагнитного слоя $2 \cdot 10^4 \text{ нм}^3$. При толщине слоя в 2 нм это приводит к минимальному латеральному размеру ячейки $l_{\min} \approx 100 \text{ нм}$, выходящему за границы области существования монокристаллического состояния. Полученное ограничение препятствует масштабированию размеров ячейки в диапазон десятков нанометров. У терфенола D константа B в 20 раз больше [26], что дает значение $l_{\min} \approx 20 \text{ нм}$.

Видно, что ограничение сверху на латеральный размер ячейки, определяемое разностью потенциалов, и ограничение на него снизу, связанное с наличием суперпарамагнитного порога, оставляют не слишком широкую область возможных значений l в диапазоне десятков — сотен нанометров.

3. Упругое взаимодействие со слоем пьезоэлектрика

В данном разделе мы рассмотрим случай, когда приложение электрического поля создает в электрочувствительном слое пьезоэлектрическую деформацию, исчезающую вместе с полем. Исходное и конечное состояния слоя совпадают. Поле удобно прикладывать перпендикулярно слоям. Для снятия вырождения пьезоэлектрические модули, отвечающие за растяжение (сжатие) в двух взаимно-перпендикулярных направлениях в плоскости слоя, должны отличаться. Для этого можно использовать электрочувствительный слой ромбической сингонии или тетрагональной сингонии с осью четвертого порядка, лежащей в плоскости слоя.

Для характерных значений пьезоэлектрических модулей $d_{ijk} \approx 2 \dots 4 \cdot 10^{-10} \text{ Кл/Н}$ и напряженностей электрических полей $E < 1 \text{ МВ/м}$, получаем относительную деформацию $\epsilon \sim 0,01 \dots 0,03 \%$, т. е. меньшую, чем в случае электрочувствительного слоя сегнетоэлектрика-сегнетоэластика. Поскольку в случае рассматриваемого механизма наводимая магнитная анизотропия должна превышать собственную анизотропию ферромагнитного слоя (в противном случае система не преодолет барьера между двумя равновесными направлениями намагниченности, существовавшими в отсутствие взаимодействия с электрочувствительным слоем), то при $B \approx -10 \text{ МДж/м}^3$ [25] получаем ограничение на объемную плотность собственной энергии анизотропии ферромагнитного слоя $K_0 < 1 \text{—} 3 \text{ кДж/м}^3$. Столь малое значение константы анизотропии увеличивает минимальный объем, необходимый для превышения суперпарамагнитного порога, а вместе с ним и минимальный латеральный размер ячейки.

Поскольку рассмотренное в предшествующем разделе ограничение сверху на латеральный размер

ячейки, определяемое создаваемой разностью потенциалов, остается в силе, то область возможных значений l становится очень узкой или вообще исчезает.

Заключение

Проведенное рассмотрение видов упругого взаимодействия ферромагнитного и электрочувствительного слоев показывает, что применение в качестве материала электрочувствительного слоя сегнетоэлектрика-сегнетоэластика является наиболее перспективным для создания MRAM с записью электрическим полем.

При создании MRAM, в которой электрическое поле прикладывается перпендикулярно слою PMN-PT, необходимо экспериментально определить характерное число последовательных циклов перехода вектора поляризации в метастабильное состояние между двумя неудачными переключениями, сопровождающимися его срывом в равновесное состояние.

Исследование прототипа памяти на основе слоя сегнетоэлектрика-сегнетоэластика следует проводить не на активной, а на пассивной подложке, создав на ней электрочувствительный слой PMN-PT с размерами, соответствующими отдельной ячейке.

Работа поддержана РФФИ (проект офи-м 16-29-14017).

Список литературы

1. Thomas R., Scott J. S., Bose D. N., Katiyar R. S. Multiferroic thin-film integration onto semiconductor devices // J. Phys.: Cond. Matt. 2010. Vol. 22. 423201 (17 pp.).
2. Ma J., Hu J., Li Z., Nan C.-W. Recent Progress in Multiferroic Magnetoelectric Composites: from Bulk to Thin Films // Adv. Matter. 2011. Vol. 23. N. 9. P. 1062—1087.
3. Морозов А. И. Переключение намагниченности ферромагнетика электрическим полем: Обзор // ФТТ. 2014. Т. 56. № 5. С. 833—840.
4. Hu J.-M., Chen L.-Q., Nan C.-W. Multiferroic heterostructures integrating ferroelectric and magnetic materials // Advanced Materials. 2016. Vol. 28. N. 1. P. 15—39.
5. Duan C.-G., Velev J. P., Sabirianov R. F. et al. Surface Magnetoelectric Effect in Ferromagnetic Metal Films // Phys. Rev. Lett. 2008. Vol. 101. 137201 (4 p.).
6. Cai T., Ju S., Lee J. et al. Magnetoelectric coupling and electric control of magnetization in ferromagnet/ferroelectric/normal-metal superlattices // Phys. Rev. B. 2009. Vol. 80. 140415 (4 p.).
7. Nan T., Zhou Z., Liu M. et al. Quantification of strain and charge co-mediated magnetoelectric coupling on ultra-thin Permalloy / PMN-PT interface // Sci. Rep. 2014. Vol. 4. 3688 (6 p.).
8. Cherifi R. O., Ivanovskaya V., Phillips L. C. et al. Electric-field control of magnetic order above room temperature // Nature Materials. 2014. Vol. 13, N. 4. P. 345—351.
9. Морозов А. И., Сигов А. С. Перемагничивание электрическим полем в двухслойной структуре ферромагнетик-магнитоэлектрик // Нано- и микросистемная техника. 2012. Т. 10, № 10. С. 10—14.

10. **Morosov A. I., Sigov A. S.** Magnetoresistive Memory with Recording by Electric Field: Is the Weak Ferromagnetism Necessary? // *J. Magn. Magn. Mater.* 2015. Vol. 383. P. 242–245.
11. **Винокуров Д. Л., Морозов А. И.** Обменная связь нанослоя мультиферроика BiFeO_3 с нанослоем ферромагнетика $\text{Co}_{0.9}\text{Fe}_{0.1}$ // *ФТТ*. 2015. Т. 57, № 9. С. 1736–1741.
12. **Берзин А. А., Винокуров Д. Л., Морозов А. И.** Эволюция вектора антиферромагнетизма мультиферроика BiFeO_3 в процессе переключения его сегнетоэлектрической поляризации // *ФТТ*. 2016. Т. 58, № 11. С. 2237–2241.
13. **Pertsev N. A.** Giant magnetoelectric effect via strain-induced spin reorientation transitions in ferromagnetic Films // *Phys. Rev. B*. 2008. Vol. 78. 212102 (4 p.).
14. **Hu J.-M., Nan C. W.** Electric-field-induced magnetic easy-axis reorientation in ferromagnetic/ferroelectric layered heterostructures // *Phys. Rev. B*. 2009. Vol. 80. 224416 (11 p.).
15. **Pertsev N. A., Viaud G., Dkhil B.** Polarization-controlled spin reorientation and resistive switching in ferromagnet-ferroelectric nanostructures and tunnel junctions // *Phys. Rev. B* 2014. Vol. 90. 024426 (8 p.).
16. **Wu T., Bur A., Wong K.** et al. Electrical control of reversible and permanent magnetization reorientation for magnetoelectric memory devices // *Appl. Phys. Lett.* 2011. Vol. 98. 262504 (3 p.).
17. **Buzzi M., Chopdekar R. V., Hockel J. L.** et al. Single domain spin manipulation by electric fields in strain coupled artificial multiferroic nanostructures // *Phys. Rev. Lett.* 2013. Vol. 111. 027204 (5 p.).
18. **Liu M., Hoffman J., Wang J.** et al. Non-volatile ferroelastic switching of the Verwey transition and resistivity of epitaxial $\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{PMN-PT}$ (011) // *Sci. Rep.* 2013. Vol. 3. 1876 (7 p.).
19. **Zhang S., Zhao Y., Xiao X.** et al. Giant electrical modulation of magnetization in $\text{Co}_{40}\text{Fe}_{40}\text{B}_{20}/\text{Pb}(\text{Mg}_{1/3}\text{Nb}_{2/3})_{0.7}\text{Ti}_{0.3}\text{O}_3$ (011) heterostructure // *Sci. Rep.* 2014. Vol. 4. 3727 (7 p.).
20. **Heidler J., Fechner M., Chopdekar R. V.** et al. Magneto-electroelastic control of magnetism in an artificial multiferroic // *Phys. Rev. B* 2016. Vol. 94. 014401 (7 p.).
21. **Wu T., Bur A., Zhao P.** et al. Giant electric-field-induced reversible and permanent magnetization reorientation on magnetoelectric $\text{Ni}/(011)[\text{Pb}(\text{Mg}_{1/3}\text{Nb}_{2/3})\text{O}_3]_{(1-x)}-[\text{PbTiO}_3]_x$ heterostructure // *Appl. Phys. Lett.* 2011. Vol. 98. 012504 (3 p.).
22. **Morosov A. I., Sigov A. S.** "Long leg" magnetoelectric memory // *J. Appl. Phys.* 2014. Vol. 115. 223909 (4 p.).
23. **Bai F., Wang N., Li J., Viehland D.** X-ray and neutron diffraction investigations of the structural phase transformation sequence under electric field in $0.7\text{Pb}(\text{Mg}_{1/3}\text{Nb}_{2/3})-0.3\text{PbTiO}_3$ crystal // *J. Appl. Phys.* 2004. Vol. 96, N. 3. P. 1620–1627.
24. **Hu J., Li Z., Wang J., Nan C.-W.** Electric-field control of strain-mediated magnetoelectric random access memory // *J. Appl. Phys.* 2010. Vol. 107. 093912 (10 p.).
25. **Tian Z., Sander D., Kirschner J.** Nonlinear magnetoelastic coupling of epitaxial layers of Fe, Co, and Ni on $\text{Ir}(100)$ // *Phys. Rev. B*. 2009. Vol. 79. 024432 (11 p.).
26. **Leung C. M., Zhuang X., Xu J.** et al. Importance of composite parameters in enhanced power conversion efficiency of Terfenol-D/PZT magnetoelectric gyrators // *Appl. Phys. Lett.* 2017. Vol. 110. 112904 (5 p.).

A. I. Morosov, D. Sc., Professor, mor-alexandr@yandex.ru

Moscow Institute of Physics and Technology (State University), Institutsky per. 9, Dolgoprudny, Moscow oblast, 141700 Russia

Corresponding author:

Morosov Aleksandr I., D. Sc., Professor, Moscow Institute of Physics and Technology (State University), Institutsky per. 9, Dolgoprudny, Moscow oblast, 141700 Russia
mor-alexandr@yandex.ru

Magnetoresistive Memory with Recording by the Electric Field on the Basis of the Elastic Interaction of Layers

Received on May 27, 2017

Accepted on June 19, 2017

The article presents the problems arising in the process of development of the magnetoresistive memory with the electric field recording (MERAM) based on elastic interaction between the electrosensitive layer and the ferromagnetic layer comprising the magnetic tunnel junction. The limitations on the size of the cells connected with the existing superparamagnetic threshold were found.

Studying of the elastic interaction between the ferromagnetic and electrosensitive layers shows that the use of the ferroelectric-ferroelastic material as the electrosensitive layer is most promising for development of MRAM with electric field recording.

For development of MRAM, in which an electric field is applied normally to the PMN-PT layer, it is necessary to determine experimentally the characteristic number of the consecutive cycles of the polarization vector transition to a metastable state between two failed switchings accompanied by a disruption to the equilibrium state.

The study of the prototype of the memory based on the ferroelectric-ferroelastic layer should be based not on an active, but on a passive substrate, on which an electrosensitive PMN-PT layer with dimensions corresponding to a separate cell has to be developed.

Keywords: magnetoresistive random access memory, recording by electric field, elastic interaction, ferroelectric, ferroelastic, ferromagnetic, magneto-elastic interaction, piezoelectric effect, superparamagnetic threshold

For citation:

Morosov A. I. Magnetoresistive Memory with Recording by the Electric Field on the Basis of the Elastic Interaction of Layers, *Nano- i Mikrosistemnaya Tekhnika*, 2017, vol. 19, no. 12, pp. 744–751.

DOI: 10.17587/nmst.19.744-751

Introduction

An increase of the capacity of the magnetoresistive memory (MRAM) on the basis of the tunnel magnetoresistance demands scaling of the memory cells in the nanometer range. For this purpose it is necessary to reduce the energy release in the process of information recording, which will be possible in case of transition from the spin-polarized current recording (STT-MRAM) to recording by the electric field. The principle for development of such a memory are being discussed actively now [1–4].

In order to ensure control by means of an electric field a dielectric (allowing to avoid ohmic losses) electrosensitive layer is necessary, the role of which can be played by a dielectric interlayer between two conducting ferromagnetic layers, which are a part of the magnetic tunnel junction, or an additional layer adjoining to one of these ferromagnetic layers.

Three main mechanisms of interaction between the ferromagnetic and electrosensitive layers are discussed:

- exchange coupling;
- elastic coupling;
- charge coupling.

The latter one works effectively in case of the superthin ferromagnetic layers, and development of a memory on its basis is the matter of future [5–8].

Principles of the memory device based on exchange interaction between the ferromagnetic layer and the multiferroic layer of BiFeO_3 are discussed in [9–12].

In the given work the elastic coupling between the layers is discussed.

1. Kinds of elastic interaction

There are two versions of memory on the basis of elastic interaction of the layers.

1. Under the influence of the electric field the electrosensitive layer is transferred into a new state, in which it remains after the field disappears. The deformations of the electrosensitive layer in the initial and final states differ. Exactly these deformations transferred to the ferromagnetic layer, because of the magnetoelastic interactions dictate the position of the light magnetization axis in this layer. For a successful realization of the scenario the electrosensitive layer should be a layer of ferroelectric-ferroelastic material, while the ferromagnetic layer should have a small own magnetocrystalline anisotropy or be amorphous, so that the magnetic anisotropy induced by the deformation would be determinative.

2. A reorientation occurs between two equilibrium positions existing in the absence of interaction with the electrosensitive layer. Under the influence of the field a piezoelectric deformation of the electrosensitive layer appears, which is transferred to the ferromagnetic layer.

Due to the magnetoelastic interaction a change of the energy of the magnetic anisotropy appears in it [13–15] and two light directions of magnetization become non-equivalent. With the growth of the electric field one of the minima of the energy of anisotropy disappears. Magnetization of the ferromagnet becomes collinear of the remained light axis. After removal of the voltage it does not change its orientation, and the electrosensitive layer returns to the initial state. Change of the voltage sign leads to replacement of stretching by compression and interchanges the positions of the energy minima of the anisotropy: the orientation, perpendicular to the one, which was realized during stretching, becomes more favorable.

Let us consider consistently these two kinds of the elastic interaction.

2. Elastic interaction with the ferroelectric-ferroelastic layer

Most of the successfully realized 90° turns of the ferromagnetic layer magnetization vector by an electric field impulse were observed during deposition of this layer on a cut (110) of the electrosensitive layer of ferroelectric-ferroelastic $\text{Pb}(\text{Mg}_{1/3}\text{Nb}_{2/3})_{0.68}\text{Ti}_{0.32}\text{O}_3$ (PMN-PT). In the rhombohedral phase of this compound the vector of the spontaneous polarization is parallel to one of the eight $[111]$ -type crystallographic directions of the pseudo-cubic lattices of perovskite. Application of the electric field with the intensity $E < 10^6$ V/m leads to a repolarization of the sample [16–19]. Variation of the polarization vector orientation (except for a 180° turn) is accompanied by a change of the direction of the rhombohedral deformations of the pseudo-cubic structure, because the polarization vector is collinear to the axis of the third order. The polarization vector preserves its new direction after removal of the electric field.

In case of a (110) cut of PMN-PT four out of the eight possible spontaneous polarization vector directions lay in the cut plane, while the other four — in the plane $(1\bar{1}0)$ perpendicular to the cut (Fig. 1).

Since the electric field in the specified experiments is applied perpendicularly to the cut, then at one polarity of the applied voltage the states 1 and 2 in fig. 1 correspond to the equilibrium states of the polarization vector, and at the other polarity — the states 3 and 4. The repolarization process proceeds in two stages. We will describe it for the initial state 1. When the electric field is applied in $[\bar{1}\bar{1}0]$ direction, the polarization vector, at first, turns by 71° and appears in the cut plane (states 5 or 7). Then it turns by 71° into position 3.

In states 1–4 the deformation created by PMN-PT layer in the ferromagnetic layer, is identical. In case of switching of the polarization between states 1 and 3 all

the action of the substrate is caused by the change of the sign of the bound charge on the border with the ferromagnetic layer, i.e. by the charge coupling of the layers [20].

For creation of two states of the electrosensitive layer differing by deformations it is necessary, that the state with the polarization vector laying in the plane of the cut should correspond to one of them, and the state, in which the polarization vector lies in the plan perpendicular to the cut, — to another. That is, an equilibrium state (for example, 1) should correspond to one sign of the applied voltage, and a metastable state (for example, 5) — to the opposite sign. If the system has to be in a metastable state, the repolarization should not occur completely, but end halfway [21].

In [16—19] such a switching was observed. However, the question is still open, whether it is possible in the course of a long-term operation of a memory cell based on the given principle, to avoid the cases when during the data recording instead of an incomplete switching we have a complete one. The answer demands carrying out of the additional research works.

Deposition of electrodes on the lateral surfaces of the electrosensitive layer solves the above problem, although it creates additional technological difficulties. As it is shown in [22], application of the electric field in parallel to the cut (100) of PMN-PT leads to a 71° turn of the polarization vector from state 1 to state 2 (Fig. 2). The direction of the deformation in the cut plane changes by 90°, which involves a corresponding turn of the light magnetization axis in the ferromagnetic layer.

In [16—19, 21] a massive PMN-PT substrate was used. The second problem arising during creation of MERAM on the basis of the elastic interaction of the layers, is connected with the fact that during the memory creation the electrosensitive layer should be individual for each cell, while the common substrate should be a passive element. At that, it prevents a deformation of the electrosensitive layer under the influence of the electric field. It is possible to exclude the specified action of the substrate by selection of a form for the electrosensitive layer: the thickness of the electrosensitive layer should significantly exceed its lateral size ("long leg memory") [22]. At the used values of the electric voltage of ~0.1 V and fields of switching of 10⁵ V/m the lateral size of a cell appears to be limited from above by the value of about hundreds of nanometers.

Let us estimate the limitations on the lateral sizes of a cell imposed by the existence of the superparamagnetic threshold. Proceeding from the value of the rhombohedral angle of PMN-PT $\alpha = 89.1^\circ$ [23], it is easy to find, that at a turn of the polarization vector from position 1 to position 5 (fig. 1) the deformation of compression $\varepsilon = -0.08\%$ of the cubic lattice in $[1\bar{1}0]$

direction is replaced by the stretching deformation of $\varepsilon = 0.08\%$. It is transferred to the ferromagnetic layer of CoFeB, inducing in it a magnetic anisotropy with the volume density of energy $K = B\varepsilon \approx 10^4$ J/m³ (the value of the magnetoelastic constant $B \approx -10$ MJ/m³ was taken from [24, 25]) due to the magnetoelastic interaction.

In order to overcome the superparamagnetic threshold it is necessary to implement inequality of $KV > 50k_B T$, where V — volume of ferromagnet, k_B — Boltzmann constant, T — temperature. The inequality provides the value of the minimal volume of the ferromagnetic layer of $2 \cdot 10^4$ nm³. At the thickness of the layer of 2 nm it leads to a minimal lateral size of a cell $l_{\min} \sim 100$ nm, which is beyond the bounds of the area of existence of a monodomain state. The received limitation prevents scaling of the cell dimensions in the range of tens of nanometers. Terfenol D has constant B which is 20 times bigger [26] and gives the value of $l_{\min} \sim 20$ nm.

It is visible that the limitation from above on the lateral size of the cell, determined by the value of the potential difference, and the limitation on it from below, connected with the presence of the superparamagnetic threshold, leave a not so wide area for possible values of l , a range from tens to hundreds of nanometers.

3. Elastic interaction with the piezoelectric layer

We will consider a case, when in the electrosensitive layer the applied electric field creates a piezoelectric deformation disappearing together with the field. The initial and final states of the layer coincide. It is convenient to apply the field perpendicularly to the layers. In order to remove the degeneracy, the piezoelectric modules, which are responsible for the stretching (compression) in two mutually perpendicular directions in the plane of the layer, should differ. For this purpose it is possible to use the electrosensitive layer of a rhombic system or a tetragonal system with the axis of the fourth order, laying in the plane of the layer.

For the characteristic values of the piezoelectric modules of $d_{ijk} \approx 2...4 \cdot 10^{-10}$ C/N and the intensities of the electric fields of $E < 1$ MV/m, we get a relative deformation of $\varepsilon \approx 0.01...0.03\%$, which is smaller, than in case with the electrosensitive layer of ferroelectric-ferroelastic. Since in case of the considered mechanism the induced magnetic anisotropy should exceed the own anisotropy of the ferromagnetic layer (otherwise the system will not overcome the barrier between the two equilibrium directions of magnetization existing in the absence of interaction with the electrosensitive layer), then at $B \approx -10$ MJ/m³ [25] we get a limitation on the volume density of the own anisotropy energy of the

ferromagnetic layer of $K_0 < 1...3 \text{ kJ/m}^3$. Such a small value of the anisotropy constant increases the minimal volume, necessary for exceeding the superparamagnetic threshold, and together with it also the minimal lateral size of a cell.

Since the restriction considered in the previous section from above on the lateral size of the cell, determined by the created potential difference, remains in force, the area of possible values of l becomes very narrow or disappears altogether.

4. Conclusion

The undertaken review of the kinds of elastic interaction of the ferromagnetic and electrosensitive layers shows, that application of the ferroelectric-ferroelastic as a material of the electrosensitive layer is most promising for development of MRAM with recording by the electric field.

During development of MRAM, in which the electric field is applied perpendicularly to the layer of PMN-PT, it is necessary to determine experimentally the characteristic number of the consecutive cycles for the transition of the polarization vector in the metastable state between two unsuccessful switchings accompanied by its disruption in the equilibrium state.

Research of the memory prototype based on the ferroelectric-ferroelastic layer should be done not on an active, but on a passive substrate, having created an electrosensitive layer of PMN-PT with the sizes corresponding to a separate cell on it.

The work was supported by the Russian Foundation for Basic Research (project 16-29-14017).

References

1. Thomas R., Scott J. S., Bose D. N., Katiyar R. S. Multiferroic thin-film integration onto semiconductor devices, *J. Phys.: Cond. Matt.*, 2010, vol. 22, 423201 (17 p.).
2. Ma J., Hu J., Li Z., Nan C.-W. Recent Progress in Multiferroic Magnetoelectric Composites: from Bulk to Thin Films, *Adv. Matter.*, 2011, vol. 23, no. 9, pp. 1062—1087.
3. Morosov A. I. Ferromagnetic Magnetization Switching by an Electric Field: A Review, *Physics of the Solid State*, 2014, vol. 56, no. 5, pp. 865—872.
4. Hu J.-M., Chen L.-Q., Nan C.-W. Multiferroic heterostructures integrating ferroelectric and magnetic materials, *Advanced Materials*, 2016, vol. 28, no. 1, pp. 15—39.
5. Duan C.-G., Velev J. P., Sabirianov R. F. et al. Surface Magnetoelectric Effect in Ferromagnetic Metal Films, *Phys. Rev. Lett.*, 2008, vol. 101, 137201 (4 p.).
6. Cai T., Ju S., Lee J. et al. Magnetoelectric coupling and electric control of magnetization in ferromagnet/ferroelectric/normal-metal superlattices, *Phys. Rev. B.*, 2009, vol. 80, 140415 (4 p.).
7. Nan T., Zhou Z., Liu M. et al. Quantification of strain and charge co-mediated magnetoelectric coupling on ultra-thin Permalloy / PMN-PT interface, *Sci. Rep.*, 2014, vol. 4, 3688 (6 p.).
8. Cherifi R. O., Ivanovskaya V., Phillips L. C. et al. Electric-field control of magnetic order above room temperature, *Nature Materials*, 2014, vol. 13, no. 4, pp. 345—351.
9. Morosov A. I., Sigov A. S. Peremagnichivanie elektricheskim polem ferromagnetic—magnetolectric, *Nano- i Mikrosist. Tekhnika*, 2012, no. 10, pp. 10—14.
10. Morosov A. I., Sigov A. S. Magnetoiresistive Memory with Recording by Electric Field: Is the Weak Ferromagnetism Necessary? *J. Magn. Magn. Mater.*, 2015, vol. 383, pp. 242—245.
11. Vinokurov D. L., Morosov A. I. Exchange Coupling of a BiFeO₃ Multiferroic Nanolayer with a Co_{0.9}Fe_{0.1} Ferromagnetic Nanolayer, *Physics of the Solid State*, 2015, vol. 57, no. 9, pp. 1781—1786.
12. Berzin A. A., Vinokurov D. L., Morosov A. I. Evolution of the Antiferromagnetism Vector of a Multiferroic BiFeO₃ during Switching Its Ferroelectric Polarization, *Physics of the Solid State*, 2016, vol. 58, no. 11, pp. 2320—2324.
13. Pertsev N. A. Giant magnetoelectric effect via strain-induced spin reorientation transitions in ferromagnetic Films, *Phys. Rev. B.*, 2008, vol. 78, 212102 (4 p.).
14. Hu J.-M., Nan C. W. Electric-field-induced magnetic easy-axis reorientation in ferromagnetic/ferroelectric layered heterostructures, *Phys. Rev. B.*, 2009, vol. 80, 224416 (11 p.).
15. Pertsev N. A., Vaid G., Dkhil B. Polarization-controlled spin reorientation and resistive switching in ferromagnet-ferroelectric nanostructures and tunnel junctions, *Phys. Rev. B.*, 2014, vol. 90, 024426 (8 p.).
16. Wu T., Bur A., Wong K. et al. Electrical control of reversible and permanent magnetization reorientation for magnetoelectric memory devices, *Appl. Phys. Lett.*, 2011, vol. 98, 262504 (3 p.).
17. Buzzi M., Chopdekar R. V., Hockel J. L. et al. Single domain spin manipulation by electric fields in strain coupled artificial multiferroic nanostructures, *Phys. Rev. Lett.*, 2013, vol. 111, 027204 (5 p.).
18. Liu M., Hoffman J., Wang J. et al. Non-volatile ferroelastic switching of the Verwey transition and resistivity of epitaxial Fe₃O₄/PMN-PT (011), *Sci. Rep.*, 2013, vol. 3, 1876 (7 p.).
19. Zhang S., Zhao Y., Xiao X. et al. Giant electrical modulation of magnetization in Co₄₀Fe₄₀B₂₀/Pb(Mg_{1/3}Nb_{2/3})_{0.7}Ti_{0.3}O₃ (011) heterostructure, *Sci. Rep.*, 2014, vol. 4, 3727 (7 p.).
20. Heidler J., Fechner M., Chopdekar R. V. et al. Magneto-electroelastic control of magnetism in an artificial multiferroic, *Phys. Rev. B.*, 2016, vol. 94, 014401 (7 p.).
21. Wu T., Bur A., Zhao P. et al. Giant electric-field-induced reversible and permanent magnetization reorientation on magnetoelectric Ni/(011)[Pb(Mg_{1/3}Nb_{2/3})O₃]_(1-x)-[PbTiO₃]_x heterostructure, *Appl. Phys. Lett.*, 2011, vol. 98, 012504 (3 p.).
22. Morosov A. I., Sigov A. S. "Long leg" magnetoelectric memory, *J. Appl. Phys.* 2014, vol. 115, 223909 (4 p.).
23. Bai F., Wang N., Li J., Viehland D. X-ray and neutron diffraction investigations of the structural phase transformation sequence under electric field in 0.7Pb(Mg_{1/3}Nb_{2/3})-0.3PbTiO₃ crystal, *J. Appl. Phys.*, 2004, vol. 96, no. 3, pp. 1620—1627.
24. Hu J., Li Z., Wang J., Nan C.-W. Electric-field control of strain-mediated magnetoelectric random access memory, *J. Appl. Phys.*, 2010, vol. 107, 093912 (10 p.).
25. Tian Z., Sander D., Kirschner J. Nonlinear magnetoelastic coupling of epitaxial layers of Fe, Co, and Ni on Ir(100), *Phys. Rev. B.*, 2009, vol. 79, 024432 (11 p.).
26. Leung C. M., Zhuang X., Xu J. et al. Importance of composite parameters in enhanced power conversion efficiency of Terfenol-D/PZT magnetoelectric gyrators, *Appl. Phys. Lett.*, 2017, vol. 110, 112904 (5 p.).

А. О. Гасников, канд. техн. наук, нач. лаб., **М. И. Ершов**, инженер, ershov_michael@mail.ru, **В. В. Трушлякова**, канд. техн. наук, науч. сотр., **Е. А. Макаревская**, студент, Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования "Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет "ЛЭТИ" им. В. И. Ульянова (Ленина)", 197022, Санкт-Петербург, Российская Федерация

ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ЭЛЕКТРОННОГО ПУЧКА С ЯЧЕЙКОЙ ПАМЯТИ КРИСТАЛЛА ИМС

Поступила в редакцию 14.08.2017

Представлен анализ взаимодействия электронного пучка с ячейкой памяти для реализации процесса оценки ее состояния. Рассчитан заряд, поглощаемый слоем плавающего затвора, для различных параметров электронного пучка. Обсуждаются результаты экспериментальных исследований по изменению состояния ячейки памяти при воздействии электронного пучка.

Ключевые слова: flash-память, растровая электронная микроскопия, плавающий затвор, заряд

Введение

Проблема контрафактной продукции в микроэлектронике остро стоит как в РФ, так и во всем мире. По данным NASA до 9 % закупок от официальных представителей поставляют фальсифицированные компоненты. Элементы памяти являются одними из лидеров в процентном соотношении по количеству поддельной электронной компонентной базы (ЭКБ). Сертификационные испытания позволяют выявить значительную их часть. Одним из важнейших шагов является определение точного объема массива данных и его адресации. Для этого необходимо симитировать процесс записи в ячейку памяти.

Одним из стандартных способов помещения заряда на плавающий затвор ячейки памяти является метод инжекции горячих электронов (CNE — Channel Hot Electrons) [1]. Важнейшим параметром здесь является ток затвора I_G и как следствие эффективность инжекции:

$$n = \frac{I_G}{I_D}, \quad (1)$$

где I_D — ток стока.

Так, в ячейке flash-памяти с топологической нормой 0,35 мкм ток затвора может достигать 1...2 нА при токе стока 50...150 мкА для напряжения сток—исток $V_{DS} = 4,5$ В. Эффективность инжекции при этом составляет $n = 10^{-5}$. Количество заряда (доза), накопленное на плавающем затворе в процессе записи, будет определяться временем записи t . При $t = 5$ мс и $I_G = 1$ нА суммарный накопленный заряд составит $Q = 5 \cdot 10^{-12}$ Кл, а доза — $N \approx 3 \cdot 10^7$ электронов.

Вместе с тем при облучении интегральной схемы (ИС) памяти электронным пучком высокой энергии, а также соблюдении ряда параметров установки и соответствующей подготовке образца становится возможным изменить логическое состояние ячейки, имитируя таким образом процесс записи. Неправильно подобранные значения ускоряющего напряжения, апертуры, расстояния до образца, угла падения пучка и т. д. могут вызвать необратимые изменения в памяти, порой приводя к выводу из строя всю ИС. Сама топология массива ПЗУ: число слоев, толщина и материалы, из которых они изготовлены, влияет на выбор параметров. В то же время правильно подобранные опции позволяют локально модифицировать значения в ячейках памяти. Однако для различных образцов необходимый диапазон параметров может отличаться, а экспериментальное его определение вызвать потерю работоспособности памяти, поэтому необходимо проведение моделирования взаимодействия электронного пучка со структурой массива ПЗУ.

Структурный анализ и построение модели

В работе в качестве образца используется flash-память архитектуры NOR, входящая в состав микроконтроллера. Исследование представляет собой послойный анализ физической структуры ячейки. Он проводится для определения числа коммутационно-изолирующих слоев кристалла, их толщин, а также типа и архитектуры элементов памяти. Для восстановления топологии используются изображения поперечного сечения кристалла с FIB станции Helios Nanolab 400 [2].

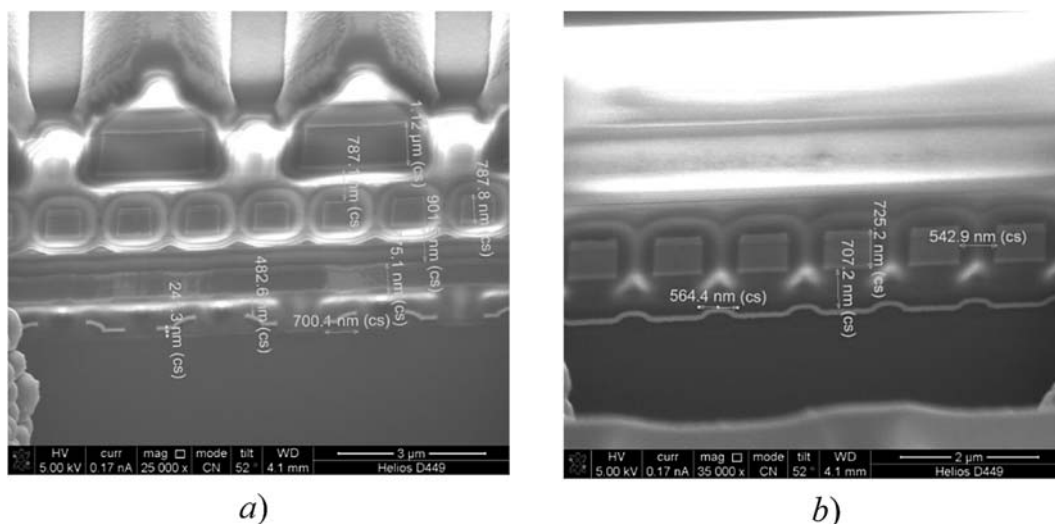


Рис. 1. Поперечные срезы вдоль адресной шины (а) и разрядной шины (b)
Fig. 1. Cross-section cuts along the address bus (a) and digit line (b)

На рис. 1 приведены ортогональные сечения кристалла микроконтроллера.

Моделирование

До сих пор существует определенный интерес к методам компьютерного имитационного моделирования электронных траекторий в твердых телах с использованием метода Монте-Карло. Одним из наиболее доступных является программный пакет Casino Monte Carlo. Исследование взаимодействия проводилось в 2D-версии [3].

После определения состава всех слоев с заданными толщинами и свойств материалов было проведено исследование взаимодействия электронного пучка с образцом при различных значениях: ускоряющего напряжения (10...30 кэВ), начального угла проникновения пучка и толщины диэлектрика. Результаты моделирования при 30 кэВ показаны на рис. 2 (см. вторую сторону обложки) и 3.

Используя выделенную область на рис. 3, было определено число электронов, поглощенных в плавающем затворе. На глубине от 4,05 до 4,1 мкм их

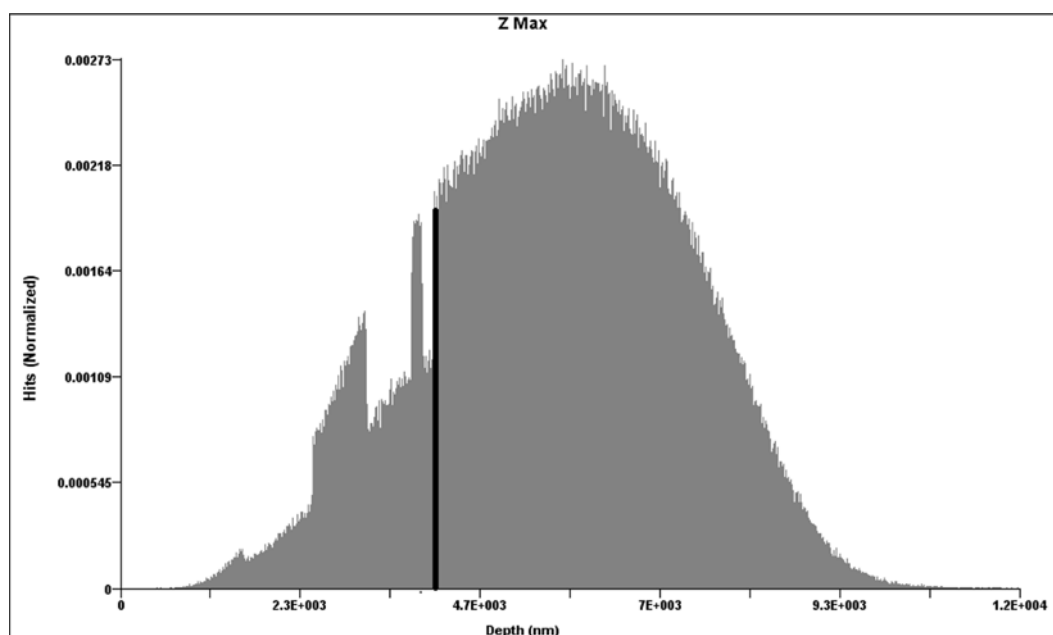


Рис. 3. Распределение числа электронов по глубине
Fig. 3. Distribution of the number of electrons by depth

Заряд, вносимый электронным пучком за время сканирования
Charge introduced by the electron beam during scanning

Время нахождения в одной точке, мкс <i>Time of presence in one point, μs</i>	0,05	0,1	0,3	1	3
Время сканирования фрейма, с <i>Scanning time per frame, s</i>	0,04	0,09	0,26	0,89	2,65
Заряд, Кл <i>Charge, C</i>	$4 \cdot 10^{-10}$	$9 \cdot 10^{-10}$	$2,6 \cdot 10^{-10}$	$8,9 \cdot 10^{-10}$	$2,65 \cdot 10^{-9}$

число составило $7 \cdot 10^3$, при исходном числе частиц 10^6 .

Это значение является одним из важнейших факторов для подбора правильных настроек растрового электронного микроскопа. Однако, используя такой параметр, как число электронов в заданной области, невозможно точно определить необходимые "настройки", требуется варьировать и время облучения. Для этого необходимо знать примерное значение вносимого заряда. Поскольку накапливаемый заряд в режиме записи на плавающем затворе составляет $5 \cdot 10^{-12}$ Кл, можно предположить, что исходное число частиц должно быть на четыре порядка больше, чем использовалось для моделирования (10^6) и составлять $\approx 10^{10}$ ($1,6 \cdot 10^{-9}$ Кл).

Требуемый заряд $Q = 1,6 \cdot 10^{-9}$ Кл можно получить подбором параметров ток и время сканирования. Следует учесть, что время сканирования выбранной области зависит от времени нахождения пучка в одной точке и разрешения сканирования. Так, для разрешения сканирования 1024×864 общее число точек фрейма — 884 736. Расчетное зна-

чение заряда, вносимого электронным пучком при токе 1 нА, приведено в табл. 1.

Время сканирования фрейма 2,65 с соответствует значению заряда, полученному в результате моделирования, и может быть использовано в дальнейшем при проведении эксперимента.

Эксперимент

В качестве образца была использована микросхема, структура которой была исследована с помощью программного пакета CASINO. К размещенному в камере РЭМ образцу через специальный разъем был подключен программатор.

После каждого облучения области памяти размером 2×2 мкм проводилась перезапись эталонного файла в память микросхемы. Эксперимент проводили при различных значениях диаметра электронного пучка. При этом ток пучка электронов, который непосредственно связан с диаметром зонда соотношением $d \approx I_0^{3/8}$, где d — диаметр пучка электронов; I_0 — ток пучка электронов, изменяется в диапазоне от 0,5 пА до 0,5 мкА [4].

Стоит учитывать, что сечение взаимодействия электронного пучка диаметром 1 нм с образцом на глубине 4 мкм имеет радиус около 2 мкм, а для пучка диаметром 7 нм — радиус 4,2 мкм. С увеличением площади области взаимодействия в ней оказывается больше запоминающих элементов. За счет этого и происходит увеличение числа измененных ячеек памяти (табл. 2).

Заключение

Установлена зависимость глубины проникновения электронов в образец. При 10 кэВ максимальная глубина проникновения составляет 1,5 мкм, при 20 кэВ — около 5 мкм, а при 30 кэВ — 9 мкм.

Моделирование обеспечивает достаточно точное определение пороговых значений параметров тока и времени для изменения состояния ячейки памяти.

Изменение состояния ячеек памяти становится возможным при ускоряющем напряжении свыше 20 кэВ.

Таблица 2
Table 2

Сводная таблица параметров воздействия и числа измененных ячеек
Summary table of the influence parameters and the number of the changed cells

Диаметр пучка, нм <i>Diameter of a beam, nm</i>	Ток пучка, нА <i>Beam current, nA</i>	Заряд, 10^{-9} Кл <i>Charge, 10^{-9} C</i>	Число измененных ячеек, шт <i>Number of the changed cells, pieces</i>
1	1	2,65	1
1,5	2,95	7,82	4
2	6,35	16,83	6
2,5	11,51	30,50	7
3	18,72	49,61	8
3,5	28,24	74,84	10
4	40,32	106,85	12
4,5	55,2	146,28	14
5	73,1	193,72	15
6	118,87	315,01	16
7	179,31	475,17	16

При ускоряющем напряжении 30 кэВ, нормальном падении пучка, токе 1 нА и времени 2,65 с реализовано прецизионное модифицирование состояния одной ячейки памяти из массива 4 Кбайт.

Список литературы

1. **Francesco D.** Performance analysis and reliability characterization of Non Volatile Memory cells with high efficiency, 2004. URL: <http://www.diegm.uniud.it/driussi/biografia/dottorato/node7.html>

2. **Лучинин В. В., Гасников А. О., Трушлякова В. В.** Основы топологического анализа кристаллов интегральных схем: учеб. пособие. СПб.: Изд-во СПбГЭТУ "ЛЭТИ", 2012. 64 с.

3. **Drouin D., Couture A. R., Joly D.** CASINO V2.42 — A Fast and Easy-to-use Modeling Tool for Scanning Electron Microscopy and Microanalysis Users Scanning, 2007. N. 29. P. 92—101.

4. **Фомин Д.** Экспериментальные методы физики твердого тела: учеб. пособие. М.—Берлин: Директ-Медиа, 2014. С. 87—89.

A. O. Gasnikov, Ph. D., Head of Laboratory, **M. I. Ershov**, Engineer, **V. V. Trushlyakova**, Ph. D., Research Associate, **E. A. Makarevskaya**, Student, Saint-Petersburg State Electrotechnical University "LETI", Saint-Petersburg, 197022, Russian Federation

Corresponding author:

Ershov Mikhail I., Engineer, Saint-Petersburg State Electrotechnical University "LETI", Saint-Petersburg, 197376, Russian Federation, ershov_michael@mail.ru

Interaction of an Electron Beam with a Memory Cell of an IC Crystal

Received on August 14, 2017

Accepted on September 11, 2017

The article presents an analysis of interaction of an electron beam with a memory cell for realization of the process of estimation of its state, calculation of the charge absorbed by the floating gate layer for various parameters of the electron beam, and the results of the experimental studies concerning the variation of the state of the memory cell under action of the electron beam.

Keywords: flash memory, scanning electron microscope, floating gate, charge

For citation:

Gasnikov A. O., Ershov M. I., Trushlyakova V. V., Makarevskaya E. A. Interaction of an Electron Beam with a Memory Cell of an IC Crystal, *Nano- i Mikrosistemnaya Tekhnika*, 2017, vol. 19, no. 12, pp. 752—756.

DOI: 10.17587/nmst.19.752-756

Introduction

The problem of counterfeit products in microelectronics is very acute all over the world. According to NASA, up to 9 % of the purchases from the official representatives contain falsified components. In percentage terms, the memory elements are among the leaders by the quantity of counterfeit in the electronic component base (ECB). Certified tests allow us to reveal a considerable part of them. One of the major steps is definition of the exact volume of the data array and its addressing. For this purpose it is necessary to simulate the recording process in a memory cell.

One of the standard ways of placing a charge on a floating gate of a memory cell is the method of injection of hot electrons (CHE — Channel Hot Electrons) [1]. The major parameter is the current of gate I_G and efficiency of the injection:

$$n = \frac{I_G}{I_D}, \quad (1)$$

where I_D — drain current.

Thus, in a flash memory cell with a topological standard of 0.35 μm the gate current can reach 1...2 nA

at the drain current of 50...150 μA for the drain-source voltage of $V_{DS} = 4.5$ V. Efficiency of the injection equals to $n = 10^{-5}$. The quantity of the charge accumulated on the floating gate in the course of recording, will be determined by the time of recording t . At $t = 5$ ms and $I_G = 1$ nA the total accumulated charge will be $Q = 5 \cdot 10^{-12}$ C, while the dose $N \approx 3 \cdot 10^7$ electrons.

At the same time, due to irradiation of the integrated circuit (IC) of the memory by a beam of high energy electrons, observance of certain parameters of setting and preparation of a sample, it becomes possible to change the logical state of a cell, simulating the recording process. Incorrectly selected values of the accelerating voltage, aperture, distance to the sample, angle of incidence of a beam, etc. can cause irreversible changes in the memory, at times leading to a breakage of IC. The topology itself of an array of ROM: the quantity of the layers, their thickness and materials of which they are made, influence selection of the parameters. At the same time, the correctly selected options allow us to modify locally the values in the memory cells. However, for various samples the range of the necessary parameters may differ, while an experimental method can

damage the memory's operability, therefore, it is necessary to carry out modeling of the interaction of the electron beam with the structure of the ROM array.

Structural analysis and model construction

This work uses as a sample the flash memory of NOR architecture, which is a part of a microcontroller. This is a level-by-level research of the physical structure of a cell. It is done in order to determine the number of the switching-insulating layers of a chip, their thicknesses, and also the type and architecture of the memory elements. For restoration of the topology the cross-section images of the chip with FIB station of Helios Nanolab 400 [2] are used.

Fig. 1 presents the orthogonal sections of the microcontroller chip.

Modeling

Till now there is a certain interest to the methods of the computer modeling of the electrons' trajectories in solid bodies with the use of the Monte-Carlo method. One of the most widely available is Casino Monte Carlo software package. Interaction research was done in 2D version [3].

After determination of the structure of the layers with the set thicknesses and properties of materials a research was done of the interaction of an electronic beam with a sample at various values of: the accelerating voltage (10...30 keV), initial angle of a beam penetration and thickness of dielectric. The results of modeling at 30 keV are shown in fig. 2 and 3.

Using the area earmarked in fig. 3, the number of the electrons in the floating gate was determined. At the depth from 4.05 up to 4.1 μm their number was $7 \cdot 10^3$, at the initial number of particles of 10^6 .

This value is one of the major factors for selection of the correct options for a scanning electron microscope. However, using the number of the electrons in the set area it is impossible to determine the necessary settings, and we have to vary the time of irradiation. For this purpose it is necessary to know an approximate value of the introduced charge. Since the accumulated charge in the recording mode on a floating gate equals to $5 \cdot 10^{-12}$ C, it is possible to assume, that the initial number of the particles should be by four orders more than the number used for modeling (10^6) and it should be equal to $\approx 10^{10}$ ($1.6 \cdot 10^{-9}$ C).

The required charge of $Q = 1.6 \cdot 10^{-9}$ C can be obtained by selection of the parameters of current and scanning time. It is necessary to take into account that the time of scanning of the selected area depends on the time of presence of a beam in one point and the resolution of scanning. Thus, for the scanning resolution of 1024×864 the total number of points in a frame is 884 736. The calculated value of the charge introduced by the electron beam at the current of 1 nA is presented in table 1.

The frame scanning time of 2.65 s corresponds to the value of the charge received as a result of modeling, and it can be used during the experiment.

Experiment

As a sample we used the microcircuit, the structure of which was investigated in Casino software package. A programmer was connected to the sample placed in SEM chamber through a special socket.

After each irradiation of the memory area with the size of $2 \times 2 \mu\text{m}$ the reference file was re-recorded into the microcircuit memory. The experiment was done at various values of the diameter of the electron beam. At that, the current of the beam of electrons, which was directly connected with the diameter of a probe by correlation $d \approx I_0^{3/8}$, where d — diameter of the beam of electrons, I_0 — current of the beam of electrons, varied within the range from 0.5 pA up to 0.5 μA [4].

It is necessary to take into account, that the section of interaction of a 1nm-diameter electron beam with the sample at the depth of 4 μm has a radius of about 2 μm , and for a beam with diameter of 7 nm the radius is 4.2 μm . With an increase of the area of interaction more recording elements appears in it. Due to this there is also an increase of the number of the memory cells (table 2).

Conclusion

The dependence of the depth of penetration of electrons in the sample was established. At 10 keV the maximal depth of penetration was 1.5 μm , at 20 keV — about 5 μm , and at 30 keV — 9 μm .

Modeling ensures a rather accurate definition of the threshold values of the current and time parameters for variation of the state of a cell memory.

Variation of the state of a cell memory becomes possible at the accelerating voltage over 20 keV.

At the accelerating voltage of 30 keV, normal incidence of a beam, current of 1 nA and time of 2.65 s, a precision modification of the state of one memory cell from an array of 4 KB was realized.

References

1. **Francesco D.** Performance analysis and reliability characterization of Non Volatile Memory cells with high efficiency, 2004. URL: <http://www.diegmi.uniud.it/driussi/biografia/dottorato/node7.html>
2. **Luchinin V. V., Gasnikov A. O., Trushljakova V. V.** Osnovy topologicheskogo analiza kristallov integral'nykh shem: ucheb. posobie. Saint Peterburg, Izd-vo LETI, 2012, 64 p. (in Russian).
3. **Drouin D. et al.** CASINO V2. 42—A Fast and Easy-to-use Modeling Tool for Scanning Electron Microscopy and Microanalysis Users // Scanning. 2007, vol. 29, no. 3, pp. 92—101.
4. **Fomin D.** Jeksperimental'nye metody fiziki tverdogo tela: ucheb. posobie, Moscow—Berlin: Direkt-Media, 2014, pp. 87—89 (in Russian).

Н. И. Мухуров, д-р техн. наук, зав. лаб., e-mail: n.mukhurov@dragon.bas-net.by,
И. В. Гасенкова, д-р физ.-мат. наук, вед. науч. сотр., **И. М. Андрухович**, науч. сотр.,
 Государственное научно-производственное объединение "Оптика, оптоэлектроника и лазерная техника",
 Минск, 220090, Беларусь,
Г. Н. Застенкер, д-р физ.-мат. наук, вед. науч. сотр.,
Н. Л. Бородкова, канд. физ.-мат. наук, ст. науч. сотр., **Б. Т. Каримов**, нач. сектора,
 Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт космических исследований РАН,
 Москва, 117997, Россия

ДАТЧИКИ ПОТОКОВ КОСМИЧЕСКОЙ ПЛАЗМЫ С ПРЕЦИЗИОННЫМИ СЕЛЕКТИРУЮЩИМИ ЭЛЕМЕНТАМИ

Поступила в редакцию 16.06.2017

Мониторинг состояния космического пространства, прогноз магнитных бурь важны как для обеспечения устойчивой работы приборов радиосвязи и навигации, так и для предупреждения негативных последствий воздействия на человека. В работе представлены разработанные совместно российскими и белорусскими специалистами датчики потоков космической плазмы с прецизионными селективирующими элементами в виде сеточных структур различной конфигурации с элементами крепления, изготовленными в едином технологическом цикле из наноструктурированных материалов. Предназначены для использования в новом поколении датчиков потоков низко- и высокоэнергетической плазмы, входящих в состав приборов для проведения плазменных измерений в окрестности Земли и в межпланетном пространстве.

Ключевые слова: датчик потоков плазмы, цилиндр Фарадея, прецизионные селективирующие элементы, наноструктурированные материалы, космический аппарат, мониторинг космического пространства

Введение

Долговременный мониторинг параметров ионосферы, некоторых областей магнитосферы и межпланетного пространства имеет большое значение [1]. Эта информация важна для радиосвязи и навигации, для прогноза космической погоды (магнитных бурь), для исследования солнечно-земных связей. Изучение процессов космической и метеорологической погоды предполагает непрерывные наблюдения с применением чувствительной к воздействию электромагнитных полей и плазмы аппаратуры и систем длительного использования на космических аппаратах [2]. Расширение сферы деятельности человечества в околоземное космическое пространство невозможно без знания характера и причин происходящих здесь физических процессов — возмущений магнитного поля Земли, вариаций потоков заряженных частиц, формирования ионосферных неоднородностей и т. п., а также возможности их прогнозировать. Поэтому исследование влияния солнечной активности на процессы в магнитосферно-ионосферной системе,

механизмов, посредством которых это влияние осуществляется, весьма актуальны.

Во многих экспериментальных исследованиях в качестве датчиков потока космической плазмы используют цилиндры Фарадея (рис. 1). Это устройство для определения полного электрического заряда и интенсивности пучка частиц названо в честь английского физика Майкла Фарадея. Оно представляет собой металлический стакан с открытым входным окном, содержащий металлический коллектор для регистрации электрического тока, возникающего в измерительном контуре при движении заряженных частиц, входящих через окно (рис. 1, а). Для разделения заряженных частиц по знаку заряда и значению их энергии предусмот-

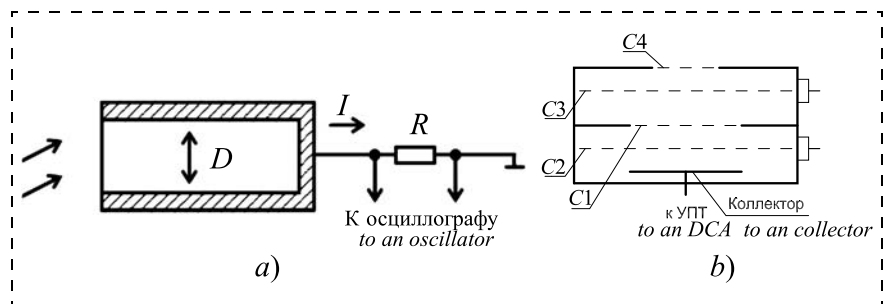


Рис. 1. Схематические изображения цилиндра Фарадея: а — общая схема; б — цилиндр с селективирующими сетками

Fig. 1. Schematic images of a Faraday cup: а — general view; б — the cup with the selecting grids

рен набор диафрагм, формирующих угловую диаграмму датчика, и набор сеток (рис. 1, б). Эти селективирующие элементы являются существенной составляющей датчиков [3, 4].

Использование цилиндров Фарадея в качестве датчиков потока космической плазмы широко распространено в мировой практике. С их помощью наиболее достоверно определяется плотность солнечного ветра. Их применяли на ряде американских космических аппаратов WIND и Voyager-1, 2. Одним из лучших по функциональным возможностям можно считать прибор IAP на французском спутнике "Demeter". Разработанные ранее датчики потоков плазмы содержали чувствительные элементы в виде селективирующих микроструктур и их изготавливали вручную из тонкой проволоки путем микросварки каждой ячейки и контурных колец. Точность выполнения, проблема неплоскостности в составе датчика и стоимость изготовления не соответствуют современному уровню технологий и не отвечают возросшим требованиям к параметрам датчиков плазмы [5].

Особенности конструктивно-технологического исполнения датчика и селективирующих элементов в нем

Конструкция датчиков потока плазмы основана на цилиндрах Фарадея и состоит (рис. 2) из корпуса 1, имеющего входное окно 2 с внешней диафрагмой 3, селективирующих супрессорного 4 и управляющего 5 элементов, внутренней диафрагмы 6 и коллекторов 7. Входное окно закрывается съемной технологической пылевлагозащитной крышкой 8. Снизу у цилиндра Фарадея

также установлена съемная технологическая крышка, прикрывающая выход коллектора.

Принцип работы датчика заключается в следующем: при попадании на коллектор потока ионов солнечного ветра в цепи коллектора возникает электрический ток, который усиливается присоединенным к коллектору усилителем постоянного тока и затем преобразуется в выходное электрическое напряжение. Электрическое соединение датчика с цепями электроники осуществляется штыревыми контактами 9 коллекторов и высоковольтными вводами 10 к селективирующим элементам. Набор электродов состоит из четырех элементов, в том числе двух диафрагм, имеющих электрическое соединение с корпусом. На супрессорные и управляющие элементы от источников электропитания подаются соответствующие относительно корпуса значения напряжения: супрессорное (-500 В) — для подавления тока вторичных электронов и фотоэлектронов с коллектора и отсечки потока электронов солнечного ветра; управляющее (от нуля до $+4000$ В) — для селекции ионов солнечного ветра по значению энергии. Супрессорные и управляющие элементы и коллектор изолированы друг от друга и от корпуса прокладками-стойками 11 из фторопласта и капролона. Комплект диафрагм, селективирующих элементов и держателей для датчиков потока космической плазмы включает сетки и держатели разных модификаций и типоразмеров в соответствии с различными типами датчиков потока плазмы. Элементы представляют собой сеточные микроструктуры с квадратными ячейками размером до 1×1 мм. Линейные составляющие микроструктур имеют квадратное сечение 20×20 мкм.

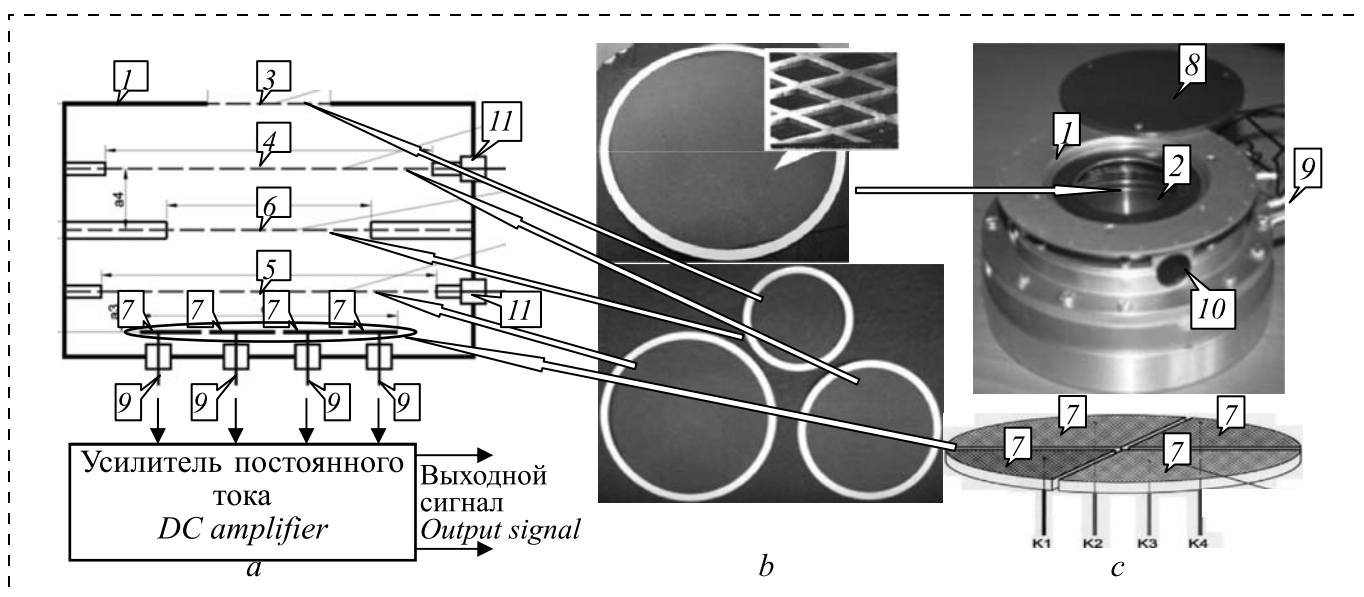


Рис. 2. Прототип четырехколлекторного датчика потока ионов

Fig. 2. Prototype of a four-collector ion stream sensor

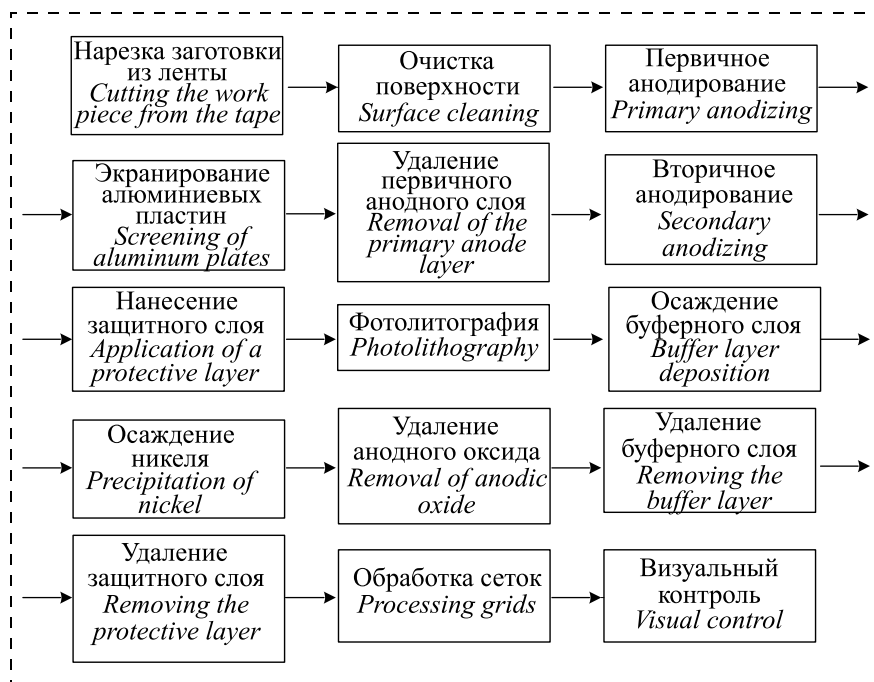


Рис. 3. Технологический процесс получения сеток

Fig. 3. Technological process for obtaining of the grids

Сеточные микроструктуры прикреплены по периметру к кольцам-держателям из аналогичных сетке материала и толщины. Габаритные размеры держателей и сеточных микроструктур составляют: внутренние диаметры $(34, 47, 60) \pm 0,1$ мм, внешние диаметры колец $(42, 55, 68) \pm 0,1$ мм, соответственно. Материал сеток и колец — никель. Прозрачность каждой из сеток при нормальном падении света составила более 90 %. Минимальная масса одной сетки не превосходила 50 мг.

Проведено сравнение различных вариантов технологических режимов формирования сложных по конфигурации металлических прецизионных деталей с использованием шаблонов-матриц из анодного оксида алюминия, изготовленных с помощью фотолитографии [6]. Предложены оптимальные технологические режимы, обеспечивающие приемлемые точности выполнения микронных размеров канавок в матрице из анодного оксида алюминия. Описан процесс фотолитографии и получения шаблона-матрицы для формирования в них прецизионных чувствительных (селектирующих) элементов. Приведен конкретный режим электрохимического осаждения никеля в канавках шаблона-матрицы и создания никелевых сеточных структур с периферийным крепежным кольцом. Показано, что внешние размеры деталей могут варьироваться от 30 до 100 мм при общей толщине 10...20 мкм, при этом микронные размеры сеточной структуры (сечение — 10...20 мкм², расстояние между ячейками — 1000 мкм) сочетаются с миллиметровыми размерами ширины внешнего крепежного кольца (5...8 мм).

Технологический процесс формирования селектирующих элементов и диафрагм в виде прецизионных сеток с элементами крепления к корпусу предполагает выполнение последовательности основных операций, представленных на рис. 3.

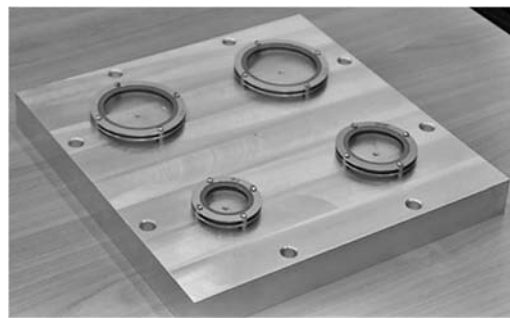
Определение способности конструкции и технологии изготовления экспериментальных образцов селектирующих элементов противостоять типичным механическим и термоциклическим воздействиям, характерным для программы космического полета, выполнено с помощью лабораторных испытаний. Для этого была разработана программа и методики предварительных комплексных испытаний (ПКИ) селектирующих элементов. Порядок и объем ПКИ представлен в табл. 1.

Таблица 1
Table 1

Состав и последовательность проверок при ПКИ

Composition and sequence of tests during PCT

№ п/п Items' numbers	Наименование работ Names of works
1	Подготовка к испытаниям Preparation for the tests
2	Проверка внешнего вида экспериментальных образцов чувствительных элементов Test of the appearance of the experimental samples of the sensitive elements
3	Приварка на держатели экспериментальных образцов Welding on the holders of the experimental samples
4	Проверка внешнего вида экспериментальных образцов чувствительных элементов Test of the appearance of the experimental samples of the sensitive elements
5	Испытание на вибропрочность при воздействии синусоидальной вибрации Test for the vibration resistance during the influence of a sinusoidal vibration
6	Контроль состояния после воздействия вибрационных нагрузок Control of the state after the influence of the vibration loads
7	Испытание на воздействия изменения температуры (от -50 до +150 °C) Test for temperature variation (from -50 up to +150 °C)
8	Контроль состояния после воздействия изменения температуры (термоциклирование) Control of the state after the temperature variation (temperature-cycle test)



a)



b)

Рис. 4. Фотографии специальных держателей для проведения механических (a) и термоциклических (b) испытаний сеточных микроструктур селективирующих элементов

Fig. 4. Photos of the special holders for carrying out of mechanical (a) and thermocyclic (b) tests of the grid microstructures of the selecting elements

Требования к условиям, обеспечению и проведению испытаний

ПКИ экспериментальных образцов чувствительных элементов (прецизионных сеток) проводили при нормальных климатических условиях: температура $(25 \pm 10) ^\circ\text{C}$; относительная влажность воздуха не более 80 %; атмосферное давление 84,0...106,7 кПа (630...800 мм рт. ст.).

Термоциклирование выполнялось в климатической камере и термокамере. При проведении испытаний на термоциклирование были созданы следующие условия: минимальная температура окружающей среды $(-50 \pm 2) ^\circ\text{C}$, максимальная температура окружающей среды $(+150 \pm 2) ^\circ\text{C}$, атмосферное давление $1,3 \cdot 10^{-7}$...106,7 кПа (10^{-6} ...800 мм рт. ст.). Для проведения ПКИ прецизионных сеток были изготовлены специальные держатели сеток для приварки и их испытания (рис. 4).

Применяемые для испытаний и обработки стандартные средства измерений зарегистрированы в Госреестре и поверены метрологической службой в соответствии с ПР 50.2.006—94. Измерительные средства и приборы, не подлежащие поверке, имели технические паспорта или сертификаты, подтверждающие их исправность.

Испытания селективирующих элементов

Критерием работоспособности селективирующих элементов — сеточных микроструктур является целостность их структуры. Целостность структуры сеток проверяли с помощью визуального контроля под микроскопом с 10-кратным увеличением (рис. 5, 6).

Конструкции селективирующих элементов выдержали испытания проверкой на пробой. Селективирующие элементы обеспечивали нормальное функционирование при приложении к ним (как в вакууме, так и на воздухе) постоянного положительного относительно корпуса электрического напряжения значением до 4,0 кВ и отрицательного постоянного относительно корпуса напряжения значением до 500 В. Испытательное электрическое напряжение прикладывалось между выводом селективирующего элемента при его установке на проводящем основании.

Селективирующие элементы нормально функционировали при температуре от -50 до $+150 ^\circ\text{C}$ и сохраняли свою работоспособность после воздействия механических нагрузок (вибрационных перегрузок, статических перегрузок от линейных ускорений и импульсных перегрузок).

Таблица 2

Table 2

Динамические перегрузки

Dynamic overloads

Режим Mode	Направление действия Direction of action	Частота, Гц Frequency, Hz	Максимальная амплитуда нагрузки, g Maximal amplitude of load, g	Время воздействия, с Influence duration, s	Число нагружений Number of loads
1	X	10...30	7	0,2	6
2	Y, Z	4...10	3	1,0	2

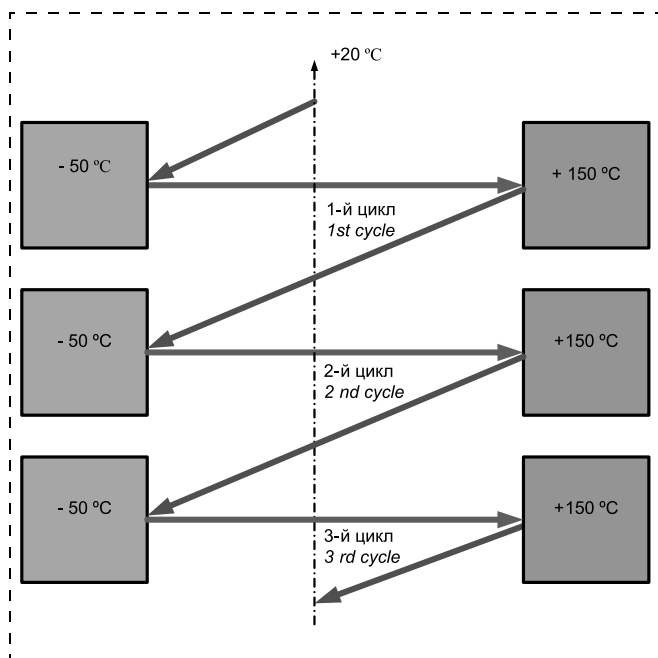


Рис. 5. Схематическое изображение процесса термоциклических испытаний селектирующих элементов

Fig. 5. Schematic image of the process of the thermocyclic tests of the selecting elements

Статические перегрузки (действовали совместно 15 мин): $n_x = \pm 4,0$ g; $n_y = \pm 0,5$ g; $n_z = \pm 0,5$ g. Значения параметров динамических нагрузок приведены в табл. 2. Испытания проводили для пер-

вого диапазона на частоте 15 Гц, для второго диапазона на частоте 6 Гц.

Сводные данные результатов проверок после каждого вида испытаний представлены в табл. 3 и 4. При этом номерами 1-1, 1-2 обозначены сеточные структуры диафрагм, 2-21, 2-2 — сеточные структуры супрессорных электродов, 3-1, 3-2 — сеточные структуры управляющих электродов. Анализ качества разработанных селектирующих элементов после предварительных комплексных испытаний подтвердил неизменность геометрических параметров. Отдельные ячейки с незначительным отклонением от контролируемых параметров при общем числе ячеек в несколько сотен практически не смогут оказывать сколь заметного влияния на характеристики датчиков плазмы.

Заключение

Разработанные селектирующие элементы в виде прецизионной сетки с элементами крепления к корпусу удовлетворяют техническим требованиям к ним (значения прозрачности, однородности и целостности структуры, отклонения от плоскостности, надежности крепления контактов, теплового режима, стойкости к вибрационным и ударным воздействиям и т. д.) и, как следствие, возможности использования таких элементов в составе нового поколения датчиков потоков космической плазмы.

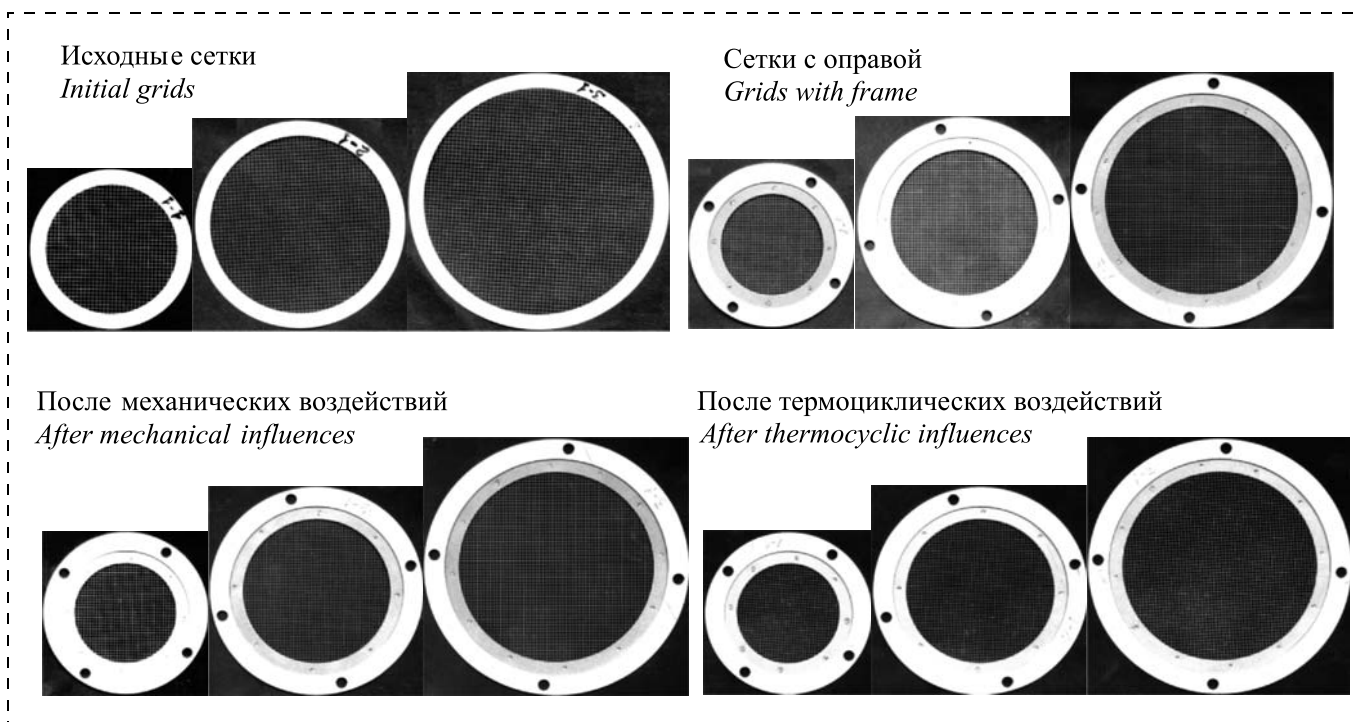


Рис. 6. Селектирующие элементы различных диаметров в исходном состоянии, после микросварки оправы, механических и термоциклических воздействий

Fig. 6. Selecting elements of various diameters in the initial state, after microwelding of the frame, mechanical and thermocyclic influences

Таблица 3
Table 3

Испытание на вибропрочность при воздействии синусоидальной вибрации
Test for vibration resistance during the influence of a sinusoidal vibration

Параметры / <i>Parameters</i>	1-1	1-2	2-1	2-2	3-1	3-2
Целостность ячеек <i>Integrity of the cells</i>	0	2	2	2	2	3
Провисание ячеек <i>Sagging of the cells</i>	Малое 1 <i>Small 1</i>	Среднее 2 <i>Medium 2</i>	Среднее 6 <i>Medium 6</i>	Среднее 5 <i>Medium 5</i>	Среднее 2 <i>Medium 2</i>	Нет <i>No</i>
Степень кручения линейных составляющих ячеек <i>Degree of torsion of the cells linear components</i>	Нет 0 <i>No 0</i>	Нет <i>No</i>	Нет <i>No</i>	Нет <i>No</i>	Нет <i>No</i>	Нет <i>No</i>
Правильность формы контура ячеек <i>Shape accuracy of the cell contour</i>	Незнач. 5 <i>Insignif. 5</i>	Незнач. 5 <i>Insignif. 5</i>	Нет <i>No</i>	Нет <i>No</i>	Нет <i>No</i>	Нет <i>No</i>
Провисание сетки по всему полю <i>Grid sagging all over the field</i>	Нет <i>No</i>	Нет <i>No</i>	Нет <i>No</i>	Нет <i>No</i>	Нет <i>No</i>	Нет <i>No</i>
Волнистость сетки по всему полю <i>Grid sinuosity all over the field</i>	Нет <i>No</i>	Нет <i>No</i>	Нет <i>No</i>	Нет <i>No</i>	Нет <i>No</i>	Нет <i>No</i>

Таблица 4
Table 4

Испытание на воздействия изменения температуры от –50 до +150 °С
Test for the influences of the temperature variation from –50 up to +150 °C

Параметры / <i>Parameters</i>	1-1	1-2	2-1	2-2	3-1	3-2
Целостность ячеек <i>Integrity of the cells</i>	2	3	11	4	18	19
Провисание ячеек <i>Sagging of the cells</i>	Малое 3 <i>Small 3</i>	Малое 2 <i>Small 2</i>	Малое 12 <i>Small 12</i>	Малое 11 <i>Small 11</i>	Малое 9 <i>Small 9</i>	Малое 12 <i>Small 12</i>
Степень кручения линейных составляющих ячеек <i>Degree of torsion of the linear components of the cells</i>	Малая 4 <i>Small 4</i>	Малая 8 <i>Small 8</i>	Малая 3 <i>Small 3</i>	Малая 8 <i>Small 8</i>	Малая 7 <i>Small 7</i>	Средняя 11 <i>Medium 11</i>
Правильность формы контура ячеек <i>Shape accuracy of the cell contour</i>	Незнач. 7 <i>Insignif. 7</i>	Незнач. 9 <i>Insignif. 9</i>	Незнач. 6 <i>Insignif. 6</i>	Незнач. 6 <i>Insignif. 6</i>	Незнач. 14 <i>Insignif. 14</i>	Незнач. 14 <i>Insignif. 14</i>
Провисание сетки по всему полю <i>Grid sagging all over the field</i>	Очень Малое <i>Very small</i>	Очень Малое <i>Very small</i>	Малое <i>Small</i>	Очень Малое <i>Very small</i>	Малое <i>Small</i>	Незнач. 10 <i>Insignif. 10</i>
Волнистость сетки по всему полю <i>Grid sinuosity all over the field</i>	Нет <i>No</i>	Нет <i>No</i>	Нет <i>No</i>	Нет <i>No</i>	Нет <i>No</i>	Малое <i>Small</i>

мы для проведения реальных космических экспериментов.

Создание нового поколения датчиков потоков космической плазмы с разработанными селективными элементами позволит заменить собой несколько одноколлекторных цилиндров Фарадея, что приведет к существенному уменьшению массы и объема плазменного спектрометра при выполнении всех необходимых задач. Наличие нескольких коллекторов и параллельных измерительных цепей обеспечит резервирование, возможность гибкого алгоритма работы и тем самым существенно повысит надежность прибора.

Список литературы

1. **Фундаментальные** космические исследования. В 2 кн. Кн. 2. Солнечная система / Науч. ред. д-р техн. наук, проф. Г. Г. Райкунова. М.: Физматлит, 2014. 456 с.

2. **Сафаргалеев В. В.** Возмущения магнитосферно-ионосферной системы в арктических широтах и задачи мониторинга космической погоды: Автореф. дис. ... докт. физ.-мат. наук. Апатиты, 2011. 29 с.

3. **Застенкер Г. Н., Храпченков В. В., Колоскова И. В.** Быстрые вариации величины и направления потока ионов солнечного ветра // Космические исследования. 2015. Т. 53, № 1. С. 63–74.

4. **Гагуа И. Т., Гагуа Т. И., Застенкер Г. Н.** Определение величины и направления потока ионов солнечного ветра по показаниям трех интегральных цилиндров Фарадея в приборе БМСВ (эксперимент "Плазма-Ф" на спутнике "Спектр-Р") (Препринт / Институт космических исследований, Пр-2151). М.: 2008. 35 с.

5. **Москалев В. А., Шестаков В. Г.** Контроль и измерение параметров пучков заряженных частиц. М.: Атомиздат, 1973. 69 с.

6. **Мухуров Н. И., Гасенкова И. В., Андрухович И. М.** Особенности формирования прецизионных чувствительных элементов датчиков космической плазмы // Нано- и микросистемная техника. 2015. № 1. С. 48–56.

N. I. Mukhurov, D. Sc., Head of Laboratory, e-mail: n.mukhurov@dragon.bas-net.by,
I. V. Gasenkova, D. Sc., Leading Researcher, **I. M. Andrukhovich**, Researcher,
State Scientific-Production Enterprise of Optics, Optoelectronics and Laser Technology, Minsk,
220090, Belarus,
G. N. Zastenker, D. Sc., Leading Researcher, **L. N. Borodkova**, Ph. D., Senior Researcher,
B. T. Karimov, Head of Sector
Space Research Institute of the Russian Academy of Sciences (IKI), Moscow, 117997, Russian Federation

Corresponding author:

Mukhurov Nicolay I., D. Sc., Head of Laboratory, State Scientific-Production Enterprise of Optics, Optoelectronics and Laser Technology, Minsk, 220090, Belarus, e-mail: n.mukhurov@dragon.bas-net.by

Space Plasma Stream Sensors with Precision Selecting Elements

Received on June 16, 2017

Accepted on July 14, 2017

Monitoring and forecasting of the space weather are important for a stable operation of the radio communication and navigation devices, and for prevention of the negative consequences for people. The paper presents sensors of space plasma streams with precision selecting elements in the form of the grid structures of various configurations and fastening elements produced in a single technological cycle from the nanostructured materials, developed and designed jointly by Russian and Belarusian specialists for a new generation of sensors of the low- and high-energy plasma, which can be used in the instruments for measurement of the near-Earth plasma and interplanetary space.

Keywords: plasma stream sensor, Faraday cup, precision selecting elements, nanostructured materials, spacecraft, space weather monitoring

For citation:

Mukhurov N. I., Gasenkova I. V., Andrukhovich I. M., Zastenker G. N., Borodkova L. N., Karimov B. T. Space Plasma Stream Sensors with Precision Selecting Elements, *Nano- i Mikrosistemnaya Tekhnika*, 2017, vol. 19, no. 12, pp. 757–765.

DOI: 10.17587/nmst.19.757-765

Introduction

The long-term monitoring of the ionosphere parameters and certain areas of the magnetosphere and interplanetary space is of great significance [1]. This information is also important for the radio communication and navigation, forecasting of the space weather (magnetic storms), and research of the solar-terrestrial links. Studying of the space and meteorological weather envisages continuous observations with application in space vehicles of the long-term usage equipment and systems sensitive to the influence of the electromagnetic fields and plasma [2]. Expansion of the mankind's activity in the near-Earth space is impossible without knowledge of the character and origin of the processes occurring there — excitations of the magnetic field of the Earth, variations of the streams of the charged particles, formation of the ionospheric heterogeneities, and also feasibility to predict them. Therefore, research of the influence of the solar activity on the processes in the magnetosphere-ionosphere system and of the mechanisms rendering this influence is very topical.

In many research works the Faraday cups are used as sensors of the space plasma streams (fig. 1). This device intended for determination of a full electric charge and of the intensity of a beam of particles was named in honor of the English physicist. It is a metal cup with an open entrance window, containing a metal collector for recording of the electric current arising in the measuring contour during movement of the charged particles, entering through the window (fig. 1, *a*). For selection of the charged particles by the sign of a charge and the value of their energy, a set of diaphragms is envisaged forming an angular diagram of the sensor and a set of grids (fig. 1, *b*). These selecting elements make an essential component of the sensors [3, 4].

Use of the Faraday cups as the sensors for the space plasma streams is widespread in the world practice. With their help the density of the solar wind is determined in the most authentic way. They were applied in a number of the American space vehicles. IAP device in Demeter French satellite is considered one of the best by its functionality. The developed sensors of the plasma streams contained the sensitive elements in the form

of selecting microstructures, and they were made manually of a thin wire by microwelding of each cell and the contour rings. The accuracy of implementation, the problem of nonflatness inside the sensor and the manufacturing costs do not correspond to the modern level of technologies and do not meet the increased requirements to the parameters of the plasma sensors [5].

Specific features of the design-technological version of the sensor and of the selecting elements in it

The design of the plasma stream sensors is based on Faraday cups and consists of (fig. 2) shell 1, which has an entrance window 2 with an external diaphragm 3, selecting suppressor 4 and control 5 elements, inner diaphragm 6 and collectors 7. The entrance window is closed by a demountable technological dust- and water-resistant cover of red color 8. From below of the Faraday cups there is another demountable technological cover covering the collector outlet.

The principle of operation of the sensor is the following: when a stream of ions of the solar wind comes to the collector, an electric current appears in the collector circuit, which is amplified by the direct current amplifier connected to the collector and is transformed into the output electric voltage. The electric connection of the sensor with the electronic circuits is carried out by pin contacts 9 of the collectors and high-voltage inlets 10 to the selecting elements. The set of the electrodes consists of four elements, including two diaphragms having an electric connection with the shell. From the power supply sources the corresponding voltage in relation to the shell is supplied to the suppressor and the control elements: the suppressor voltage (-500 V) — for suppression of the secondary electrons current and the photoelectrons from the collector and for a interruption of the electrons stream of the solar wind; and the control voltage (from 0 up to $+4000\text{ V}$) — for selection of the solar wind ions by energy. The suppressor and control elements and the collector are isolated from each other and from the shell by cushion-racks 11 of fluoroplastic and caprolon. The set of diaphragms, selecting elements and holders for the sensors of the space plasma stream includes grids and holders of different modifications and standard sizes according to various types of the plasma stream sensors. The elements are grid microstructures with square cells with the sizes up to $1 \times 1\text{ mm}$. The linear components of the microstructures have a square section of $20 \times 20\text{ }\mu\text{m}$. The grid microstructures are attached to the perimeter of the rings-holders of the material and thickness similar to those of the grid. The dimensions of the holders and the grid microstructures are: the inner diameters $(34, 47, 60) \pm 0.1\text{ mm}$, and the external diameters of the rings $(42, 55, 68) \pm 0.1\text{ mm}$, accord-

ingly. The material of the grids and rings is nickel. The transparency of each of the grids at a normal incidence of light is more than 90 %. The minimal weight of one grid does not surpass 50 mg.

A comparison was done of various versions of the technological modes for formation of the complex precision metal parts with the use of templates-matrixes from the anodic aluminum oxide, made by means of photolithography [6]. The optimal technological modes ensuring an acceptable accuracy of manufacturing of the micron-sized flutes in a matrix from the anodic aluminum oxide were offered. The photolithography and reception of a template-matrix for formation of the precision sensitive elements in them were described. The mode of the electrochemical deposition of nickel in the flutes of a template-matrix and creation of nickel grid structures with a peripheral fixing ring was presented. It was demonstrated, that the external sizes of the parts can vary from 30 up to 100 mm at the thickness from 10 up to 20 μm , at that, the micrometer sizes of the grid structure (section — $10\ldots 20\text{ }\mu\text{m}^2$, distance between the cells — $1000\text{ }\mu\text{m}$) agree with the millimeter sizes of the width of the external fixing ring ($5\ldots 8\text{ mm}$).

The technological process for formation of the selecting elements and the diaphragms in the form of the precision grids with the elements of fastening to the shell envisages implementation of a sequence of basic operations (fig. 3).

Determination of the design ability and manufacturing techniques of the experimental samples of the selecting elements to resist the typical mechanical and thermocyclic influences, typical for a space flight, was done by means of a laboratory research. For this purpose a program and techniques of the preliminary complex tests (PCT) of the selecting elements were developed. The order and the volume of PCT are presented in table 1.

Requirements to the conditions, support and carrying out of the tests

PCT of the experimental samples of the sensitive elements (precision grids) were done under normal climatic conditions: temperature $(25 \pm 10)\text{ }^\circ\text{C}$; relative humidity of air not more than 80 %; atmospheric pressure from 84.0 up to 106.7 kPa (630...800 mm Hg).

The temperature-cycle tests were carried out in a climatic chamber and a heat chamber. During the temperature-cycle tests the following conditions were created: the minimal ambient temperature — minus $(50 \pm 2)\text{ }^\circ\text{C}$, the maximal ambient temperature — plus $(150 \pm 2)\text{ }^\circ\text{C}$, the atmospheric pressure — from $1.3 \cdot 10^{-7}$ up to 106.7 kPa ($10^{-6}\ldots 800\text{ mm Hg}$). For PCT of the precision grids, special grid holders were made for their welding and tests (fig. 4).

The standard measuring means applied for the tests and processing were registered in the State Registry and verified by the metrological service according to PR 50.2.006-94. The measuring means and devices, which were not subject to checking, had characteristics sheets or certificates confirming their serviceability.

Tests of the selecting elements

The criterion for operability of the selecting elements — the grid microstructures is the integrity of their structure, which was checked by means of a visual control under a microscope with 10-x magnification (fig. 5, 6).

The designs of the selecting elements withstood the breakdown tests. The selecting elements ensured normal functioning, when the constant and positive in relation to the shell electric voltage, up to at 4.0 kV, and the constant and negative voltage in relation to the shell, up to 500 V, were applied to them (both in vacuum and in the air). The testing electric voltage was applied between the outlet of the selecting element and housing during installation on the conducting basis.

The selecting elements functioned normally at temperatures from — 50 up to + 150 °C and preserved their operability after the impact of mechanical loads (vibration overloads, static overloads from the linear accelerations and pulse overloads).

The static overloads (which operated jointly during 15 min) were: $n_x = \pm 4.0$ g; $n_y = \pm 0.5$ g; $n_z = \pm 0.5$ g. The values of the dynamic load parameters are presented in table 2. The tests were done for the first range on the frequency of 15 Hz, and for the second range on the frequency of 6 Hz.

The summary data of the test results after each kind of tests are presented in tables 3 and 4. At that, the numbers 1-1, 1-2 designate the grid structures of the diaphragms, 2-21, 2-2 — the grid structures of the suppressor electrodes, 3-1, 3-2 — the grid structures of the control electrodes. Analysis of the quality of the developed selecting elements after the preliminary complex tests confirmed an invariance of their geometrical parameters. Separate cells with an insignificant deviation from the controllable parameters, at the total number of cells of several hundreds, cannot practically render any appreciable influence on the characteristics of the plasma sensors.

Conclusion

The developed selecting elements in the form of a precision grid with elements of fastening to the shell meet the technical requirements to them (values of transparency, uniformity and integrity of a structure, deviation from the planeness, reliability of fastening of the contacts, the thermal mode, resistance to the vibration and shock influences, etc.) and, as consequence, there is a possibility of their use within the new generation of sensors of the space plasma streams intended for real space experiments.

Creation of a new generation of sensors of the space plasma streams with the developed selecting elements will allow us to replace several one-collector Faraday cups, which will lead to an essential reduction of the weight and volume of a plasma spectrometer during performance of the necessary functions. Presence of several collectors and parallel measuring circuits will ensure a reservation, a possibility of a flexible operation algorithm and, thus will essentially raise the reliability of the device.

References

1. *Fundamental'nye kosmicheskie issledovaniya. In 2 books. Book 2. Solnechnaya sistema*, Ed. prof. G. G. Raikunov. Moscow, Fizmatlit, 2014. 456 p.
2. **Safargaleev V. V.** *Vozmuscheniya magnitosferno-ionosfernoi sistemy v arkticheskikh shirotah i zadachi monitoringa kosmicheskoi pogody*, Avtoref. diss. ... dokt. fiz.-mat. nauk, Apatity, 2011, 29 p.
3. **Zastenker G. N., Khrapchenkov V. V., Koloskova I. V., Gavrilova E. A., Ryazanova E. E., Ryazanseva M. O., Gagua T. I., Gagua I. T., Shafrankova J., Nemechek Z., Prech L., Voita J.** *Rapid Variations of the Value and Direction of the Solar Wind Ion Flux*, *Cosmic Research*, 2015, vol. 53, no. 1, pp. 59—69.
4. **Gagua I. T., Gagua T. I., Zastenker G. N.** *Opredelenie velechiny i napravleniya potoka ionov solnechnogo vetra po pokazaniyam trekh integral'nykh cilindrov Faradeya v pribore BMSB* (eksperiment "Plasma-F" na sputnike "Spektr-R" (Preprint / Institut kosmicheskikh issledovaniy, Pr-2151), Moscow, 2008, 35 p.
5. **Moskalev V. A., Shestakov V. G.** *Kontrol' i izmerenie parametrov puchkov zaryazhennykh chastic*, Moscow, Atomizdat, 1973, 69 p.
6. **Mukhurov N. I., Gasenkova I. V., Andruhovich I. M.** *Specific Features of Formation of Precision Sensitive Elements for the Space Plasma Sensors*, *Nano- i Mikrosistemnaya Tekhnika*, 2015, no. 1, pp. 54—56.

УКАЗАТЕЛЬ СТАТЕЙ, ОПУБЛИКОВАННЫХ В ЖУРНАЛЕ "НАНО- И МИКРОСИСТЕМНАЯ ТЕХНИКА" В 2017 г.

ОБЩИЕ ВОПРОСЫ

Лучинин В. В. Российский пилотный проект инжинирингового центра "Гибкая печатная электроника и фотоника" № 8

НАНОТЕХНОЛОГИИ И ЗОНДОВАЯ МИКРОСКОПИЯ

Булярский С. В., Дудин А. А., Орлов А. П., Павлов А. А., Шаманаев А. А., Леонтьев В. Л. Резонанс углеродной нанотрубки с током в электромагнитном поле № 7

Глухова О. Е., Савостьянов Г. В. Транспортные свойства оксидированных графеновых нанолент с зигзагообразным краем: влияние эпоксидных групп № 7

Кулиш О. А., Векшин М. М. Интегрально-оптический преобразователь поляризации излучения на основе асимметричного волновода в стекле № 11

Ларионов Ю. В. Сканирование поверхности кремния в высоковольтном РЭМ без контаминации ... № 6

МОДЕЛИРОВАНИЕ И КОНСТРУИРОВАНИЕ МНСТ

Абрамов И. И., Коломейцева Н. В., Лабунов В. А., Романова И. А. Моделирование полевых графеновых транзисторов с одним и двумя затворами № 12

Алферов Ж. И., Zubov Ф. И., Цырлин Г. Э., Жуков А. Е., Шаврук Н. В., Павлов А. Ю., Пономарев Д. С., Ключков А. Н., Хабибуллин Р. А., Мальцев П. П. Создание первого отечественного квантово-каскадного лазера терагерцового диапазона частот № 5

Бороденков Н. И., Бохов О. С., Смирнов А. В., Шилков В. М. Разработка программных средств для проектирования и создания устройств гибкой печатной электроники № 8

Дашков А. В., Шаврук Н. В., Щеглова Т. А., Тарасов Н. С., Мальцев П. П., Хабибуллин Р. А. Апробация способа изготовления контейнеров из антистатического материала для полупроводниковых кристаллов сложной формы на основе 3D-печати № 9

Деспотули А. Л., Андреева А. В. Размерные факторы и нелинейные процессы в структурно-динамическом подходе наноэлектроники № 6

Исмагилов Ф. Р., Вавилов В. Е., Бекузин В. И., Айгузина В. В. Проектирование сверхвысокоскоростных электрических микромашин с частотой вращения 1,2 млн оборотов в минуту № 10

Колчужин В. А., Князев И. В., Палагин М. С., Глухов А. В. Макромоделирование торсионного микроэлектромеханического резонатора № 2

Ларионов Ю. В., Озерин Ю. В. Вариация значений ширины выступов при измерении их в низковольтном РЭМ № 12

Лобанов С. В., Федоров И. А., Шешин Е. П., Григорьева И. Г., Антонов А. А. Разработка автоэмиссионных установок с планарными цилиндрическими магнет-

катодов методом прессования пирографита с тройным карбонатом № 1

Путинцев Б. Г. Разработка однокристалльных приемопередающих модулей V-диапазона на нитриде галлия № 12

Рубцов Ю. В., Алексеева А. В. Разработка IBIS-модели микросхем концентраторов сетей, применяемых для проектирования телекоммуникационной аппаратуры № 6

Рыжий В. И., Рыжий М. В., Отсуджи Т. На пути к реализации терагерцовых лазеров на основе графеновых гетероструктур № 5

Старых А. А., Ковалев А. В. Конвейерное суммирование с использованием самосинхронных схем № 3

Тимошенков С. П., Шалимов А. С., Головинский М. С., Калугин В. В., Коробова Н. Е., Тимошенков А. С., Анчутин С. А. Маршрут проектирования МЭМС-акселерометра, оптимизированного по выбранным параметрам для обеспечения возможности самокалибровки. № 12

МАТЕРИАЛОВЕДЧЕСКИЕ И ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ МНСТ

Алешин А. Н. Изучение деформационного поля в слоях метаморфного ступенчатого буфера на основе тройных растворов $\text{In}_x\text{Al}_{1-x}\text{As}$ методом построения карт обратного пространства № 9

Афанасьев П. В., Бохов О. С., Мандрик И. В., Старцев В. А. Каплеструйная технология гибкой печатной электроники для изготовления пассивных элементов № 8

Боброва Ю. С., Андроник М. Методы нанесения толстых слоев жидких фотополимеров высокой вязкости № 4

Бохов О. С., Афанасьев П. В. Электрогидродинамический способ печати наноразмерных 2D- и 3D-структур № 8

Бугаев А. С., Глинский И. А., Пушкарев С. С., Лаврухин Д. В., Ячменев А. Э., Хабибуллин Р. А., Пономарев Д. С. Разработка материалов и фотопроводящих антенн на их основе для генерации и детектирования импульсного и непрерывного терагерцового (ТГц) излучения № 5

Булатов М. Ф., Кутвицкий В. А., Миронова Е. В., Останина О. И., Плотникова А. А. Использование гекса-цианоферратов для создания полимерных рецепторных слоев сенсорных гетероструктур № 10

Буряков А. М., Билык В. Р., Мишина Е. Д., Галиев Г. Б., Климов Е. А., Мальцев П. П., Пушкарев С. С. Генерация терагерцового излучения низкотемпературными мультислойными эпитаксиальными пленками $i\text{-LT-GaAs}/n\text{-GaAs}$ на подложках GaAs с ориентациями (100) и (111)A № 2

Васильев Д. Д., Моисеев К. М. Расчет движения подложки для повышения равномерности покрытий в ронах № 10

Войцеховский А. В., Кульчицкий Н. А., Несмелов С. Н., Дзядух С. М. Влияние приповерхностных варизонных слоев на адмиттанс МДП-структур на основе МЛЭ $n(p)$ - $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$ ($x = 0,21...0,23$) в диапазоне температур (9...77) К. № 1

Воловликова О. В., Гаврилов С. А., Сыса А. В., Савицкий А. И., Дронова Д. А., Железнякова А. В., Павлов А. А. Сравнительный анализ процессов металл-стимулированного химического травления кремния с использованием тонких пленок Ag и Ni для формирования 3D-структур Si. № 11

Галиев Г. Б., Буряков А. М., Билык В. Р., Хусяинов Д. И., Мишина Е. Д., Климов Е. А., Ключков А. Н., Пушкарев С. С., Васильевский И. С., Грехов М. М., Трунькин И. Н., Васильев А. Л. Терагерцевое излучение эпитаксиальных низкотемпературных GaAs структур на подложках GaAs (100) и (111)A. № 9

Гусев Е. Э., Дедкова А. А., Дюжев Н. А., Ковалев А. С., Онуфриенко А. П. Исследование влияния операционных параметров процесса PECVD на характеристики пленок диоксида кремния. № 6

Данилаев М. П., Дорогов Н. В., Куклин В. А., Курангышев А. В. Измерение характерного размера субмикронных частиц в технологических процессах методом светового рассеяния. № 7

Дюжев Н. А., Махиборода М. А., Гусев Е. Э., Катеев М. В. Формирование планарной поверхности пластин для проведения технологических операций контактной литографии и бондинга. № 1

Желаннов А. В., Ионов А. С., Петров А. В., Селезнев Б. И. Использование технологии микропрофилирования при формировании приборных структур на основе нитрида галлия. № 7

Заблоцкая Е. Ю., Род И. А., Таренкин А. И., Казачков А. О., Шамярян Д. Г. Автоматизированная инспекция дефектов литографии как метод контроля качества МЭМС-элементов. № 10

Зайцев Н. А., Красников Г. Я. Влияние особенностей химической связи Si—O на структурно-примесные свойства диоксида кремния. № 11

Камалджит Сингх. Выбор материала подложки в технологиях производства МЭМС для СВЧ-приложений. № 7

Климов Е. А., Лаврухин Д. В., Пушкарев С. С., Рубан О. А., Алешин А. Н. Неразрушающие методы контроля арсенидных и нитридных гетероструктур с квантовой ямой. № 5

Ковалевский А. А., Комар О. М. Исследование самоорганизации нанокластеров тетраоксисилицида титана при разложении воды на полупроводниковом дисцилиде титана. № 1

Ковалевский А. А., Строгова А. С., Комар О. М. Исследование влияния чистоты поверхности подложек на процесс образования и трансформацию нанокластеров кремний-германий. № 3

Ковалевский А. А., Строгова А. С., Шевченко А. А., Котов Д. А., Гранько С. В. Получение методом механохимии ультрадисперсных порошков кремния и исследование их физико-химических свойств. № 11

Конаков С. А., Дзюбаненко С. В. Влияние явления проскальзывания скорости на режимы работы и другие

характеристики газового химического микрореактора. № 10

Кульчицкий Н. А., Маянов Е. П., Наумов А. В. Арсенид галлия и приборы нано-, микро- и оптоэлектроники на его основе. № 4

Мустафаев Г. А., Мустафаева Д. Г., Мустафаев М. Г. Получение однородных по структуре и равномерных по толщине диэлектрических покрытий при формировании приборных структур. № 3

Мустафаев Г. А., Мустафаева Д. Г., Мустафаев М. Г. Влияние ионизирующих излучений на электрофизические свойства халькогенидов элементов первой группы. № 4

Мустафаев Г. А., Мустафаева Д. Г., Мустафаев М. Г. Формирование структур пленочных преобразователей с заданными параметрами. № 1

Непочатенко В. А., Непочатенко И. А. Определение температурной зависимости параметров кристаллической решетки в сегнетоэлектриках при фазовом переходе $m3mF4mm$ № 3

Павлов А. Ю. Переход от сплавной к несплавной технологии омических контактов при росте диапазона рабочих частот СВЧ МИС на основе нитрида галлия. № 9

Путинцев Б. Г. Разработка однокристалльных приемопередающих модулей V-диапазона на нитриде галлия. № 12

Ревин М. В., Коблов Э. А., Смотрин Д. С., Иванов В. А., Котков А. П., Данильцев В. М., Хрыкин О. И., Дроздов М. Н., Юнин П. А., Молдавская Л. Д., Шашкин В. И. Транзисторные псевдоморфные гетероструктуры на основе (Al-In-Ga)As, выращенные методом металлоорганической газовой эпитаксии. № 11

Симаков В. В., Синев И. В., Смирнов А. В., Осыко И. Д., Гребенников А. И., Сергеев С. А. Влияние освещения на газочувствительность тонких пленок диоксида олова к парам этанола при комнатной температуре. № 1

Смолин В. К. Формирование 3D-элементов в кремниевых структурах. № 7

Стецюра С. В., Буланов М. С., Козловский А. В., Мальяр И. В. Электростатический потенциал как фактор контролируемого синтеза гибридных структур. № 2

Топталов С. И., Устинов Е. М., Афанасьев П. В., Бохов О. С., Мандрик И. В., Старцев В. А. Создание антенных печатных модулей каплеструйной технологией. № 8

Трофимов А. А. Оптимизация толщины подложки приборных пластин сапфира и карбида кремния. № 4

Федоров Ю. В., Бугаев А. С., Павлов А. Ю., Гнатюк Д. Л., Матвеев О. С., Павлов В. Ю., Слаповский Д. Н., Томаш К. Н., Енюшкина Е. Н., Галиев Р. Р., Майтама М. В., Зуев А. В., Крапунин Д. В., Гамкрелидзе С. А. Технология изготовления и разработка монолитных интегральных схем на основе нитрида галлия. № 5

Щаврук Н. В., Редькин С. В., Трофимов А. А., Иванова Н. Е., Скрипниченко А. С., Кондратенко В. С., Стыран В. В. Разделение полупроводниковых пластин из твердого материала на кристаллы. № 5

Юхневич А. В., Майер И. А., Усенко А. Е. К технологии изготовления НЭМС-устройств № 3

ЭЛЕМЕНТЫ МНСТ

Адамов Ю. Ф., Балака Е. С., Исаева Т. Ю., Матвеев О. С. Распределенная система защиты КМОП-микросхем от электростатических разрядов . . . № 1

Афонин С. М. Структурно-параметрические модели электромагнитоупругих актюаторов для нано- и микросистемной техники № 4

Баранов А. А., Жукова С. А., Обижаев Д. Ю, Турков В. Е., Заруцкий А. А., Гудошников С. А. Магнитоимпедансный чувствительный элемент на основе аморфного ферромагнитного микропровода и тонкопленочной катушки № 10

Бардин В. А., Васильев В. А., Громков Н. В., Жоао А. Ж. Универсальный модуль ЧИРП и его интеграция с нано- и микроэлектромеханическими системами датчиков и актюаторов № 2

Басов М. В., Пригодский Д. М. Исследование чувствительного элемента датчика давления на основе биполярного тензотранзистора № 11

Белкин М. Е., Ключник Д. А., Фофанов Д. А. Характеристики электрооптического преобразования современных лазерных излучателей при распределении по оптическому волокну опорных радиосигналов дециметрового диапазона № 9

Гасников А. О., Ершов М. И., Трушлякова В. В., Макаревская Е. А. Взаимодействия электронного пучка с ячейкой памяти кристалла ИМС № 12

Гурин Н. Т., Родионов В. А., Ишелев А. И. Линейный полупроводниковый координатно-чувствительный фотоприемник с переменным напряжением питания № 2

Дорофеев Р. Ю., Козлов Д. В., Смирнов И. П., Жуков А. А. Влияние технологических погрешностей изготовления микросистемного вибрационного модулятора электрических полей на его характеристики . . . № 1

Драгунов В. П., Киселев Д. Е., Синицкий Р. Е. Особенности электромеханических взаимодействий в МЭМС с непараллельными электродами № 6

Жукова С. А., Турков В. Е., Демин С. А., Четверов Ю. С., Солюдов А. А. Чувствительные элементы инфракрасных систем технического зрения на основе микроболометрических матриц формата 640 × 480 пикселей № 2

Иванов Е. А. Методика уменьшения значения коммутируемого напряжения в силовых ключах обратноточковых источников питания № 11

Камалджит Сингх, Мина Р. К., Нирмал А. В. Реализация плоского нагревателя на кремниевых и стеклянных подложках с использованием технологии КМОП. № 11

Караян Г. С., Гандилян С. В., Гандилян В. В. Современное состояние и перспективы развития микросистемной электромеханики № 6

Козлов Д. В., Смирнов И. П., Жуков А. А., Болотник Н. Н. Микромеханические компоненты микроробототехнических устройств космического назначения. . . . № 3

Лукичев В. Ф., Лебедев К. В., Кальнов В. А. Моделирование характеристик низковольтного МЭМС-переключателя латерального типа с пружиной типа "Менандр" № 7

Лучинин В. В., Ильин С. Ю. Механоактивируемые ультрагибкие конформные интегрируемые рекуператоры энергии № 8

Масальский Н. В. Широкополосный фотонный фазовый модулятор на структуре "кремний на изоляторе" № 12

Мастеров В. В., Рогаткин Ю. Б. Цифровая ФАПЧ для технологического процесса с нормами 65 нм . . № 7

Матвеев О. С. Интегрированные антенны для использования в системах на кристалле № 9

Морозов А. И. Магниторезистивная память с записью электрическим полем на основе упругого взаимодействия слоев № 12

Мухуров Н. И., Гасенкова И. В., Андрухович И. М., Застенкер Г. Н., Бородкова Н. Л., Каримов Б. Т. Датчики потоков космической плазмы с прецизионными селективирующими элементами № 12

Садков В. Д., Фомина К. С. Поглощающие элементы для реализации широкого диапазона ослаблений. . . № 4

Садков В. Д., Фомина К. С. Расчет сопротивления пленочного элемента произвольной формы № 6

Смолин В. К. Модификация свойств резистивных элементов термической обработкой № 3

Тимошенков В. П., Хлыбов А. И., Родионов Д. В. Исследование параметров НЕМТ-транзистора в гигагерцовом диапазоне № 10

Федулов Ф. А., Фетисов Л. Ю., Чашин Д. В. Автономный маломощный источник энергии на основе широкополосного пьезоэлектрического преобразователя № 2

Фетисов Л. Ю., Серов В. Н., Быковцев Ю. А., Маковкин С. А., Фетисов Ю. К., Казакевич И. С. Пороговый датчик магнитных полей на основе автогенератора с магнитоэлектрическим резонатором . . . № 3

БИОЭЛЕКТРОНИКА

Ильин С. Ю., Лучинин М. В. Интеллектуальная искусственная кожа — эпидермальный мониторинг и коррекция биообъектов № 8

ПРИМЕНЕНИЕ НМСТ

Смолин В. К. Использование микро- и нанотехнологий в производстве малогабаритных первичных источников электропитания № 4

Адрес редакции журнала: 107076, Москва, Строминский 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 Н. В. Яшина.

Сдано в набор 21.10.2017. Подписано в печать 21.11.2017. Формат 60×88 1/8. Заказ МС1217. Цена договорная
Оригинал-макет ООО «Авансесд солюшнз». Отпечатано в ООО «Авансесд солюшнз». 119071, г. Москва, Ленинский пр-т, д. 19, стр. 1. Сайт: www.aov.ru

Рисунки к статье С. П. Тимошенкова, А. С. Шалимова, М. С. Головинского,
В. В. Калугина, Н. Е. Коробовой, А. С. Тимошенкова, С. А. Анчутина

**«МАРШРУТ ПРОЕКТИРОВАНИЯ МЭМС-АКСЕЛЕРОМЕТРА, ОПТИМИЗИРОВАННОГО ПО
ВЫБРАННЫМ ПАРАМЕТРАМ ДЛЯ ОБЕСПЕЧЕНИЯ ВОЗМОЖНОСТИ САМОКАЛИБРОВКИ»**

S. P. Timoshenkov, A. S. Shalimov, M. S. Golovinsky, V. V. Kalugin, N. E. Korobova, A. S. Timoshenkov, S. A. Anchutin

**«DESIGN ROUTE OF THE MEMS ACCELEROMETER OPTIMIZED BY THE FUNCTIONAL
PARAMETERS AIMED TO ENSURE A SELF-CALIBRATION»**

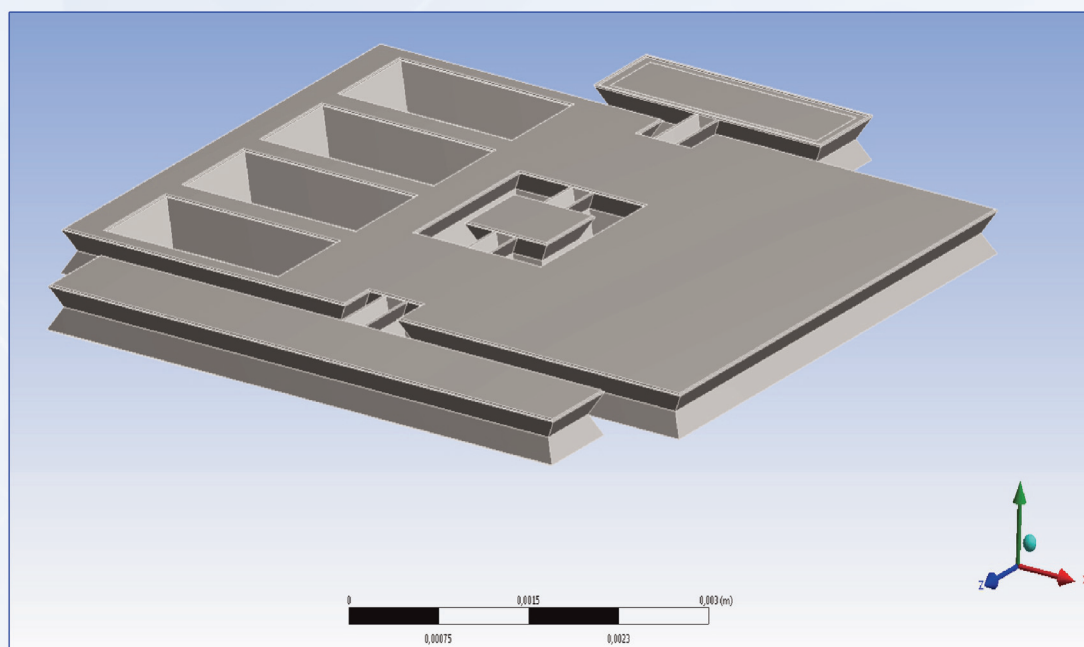


Рис. 1. Твёрдотельная модель чувствительного элемента МЭМС-акселерометра

Fig. 1. Solid-state model of the sensitive element of MEMS accelerometer

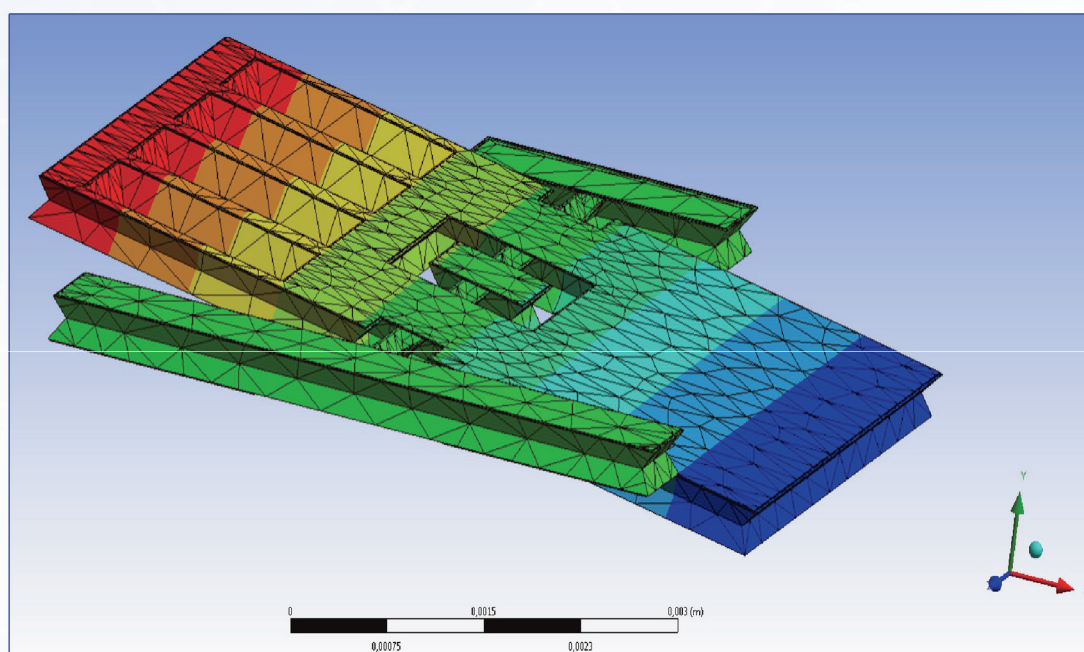


Рис. 2. Расчет максимальной деформации в конструкции ЧЭ под действием статического ускорения

Fig. 2. Calculation of the maximal deformation in the design of SE under the influence of a static acceleration

Рисунки к статье С. П. Тимошенкова, А. С. Шалимова, М. С. Головинского,
В. В. Калугина, Н. Е. Коробовой, А. С. Тимошенкова, С. А. Анчутина

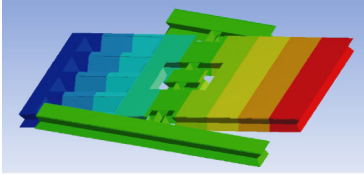
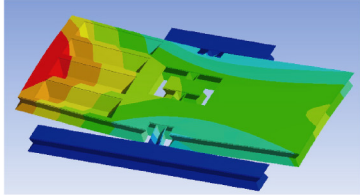
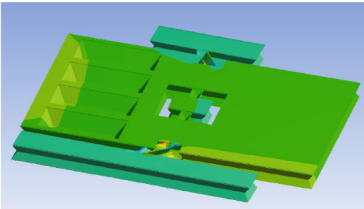
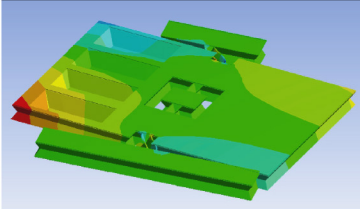
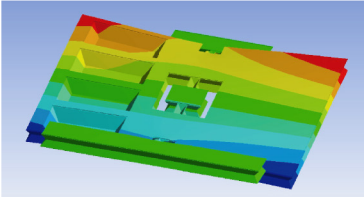
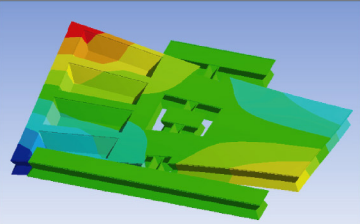
**«МАРШРУТ ПРОЕКТИРОВАНИЯ МЭМС-АКСЕЛЕРОМЕТРА, ОПТИМИЗИРОВАННОГО ПО
ВЫБРАННЫМ ПАРАМЕТРАМ ДЛЯ ОБЕСПЕЧЕНИЯ ВОЗМОЖНОСТИ САМОКАЛИБРОВКИ»**

S. P. Timoshenkov, A. S. Shalimov, M. S. Golovinsky, V. V. Kalugin, N. E. Korobova, A. S. Timoshenkov, S. A. Anchutin

**«DESIGN ROUTE OF THE MEMS ACCELEROMETER OPTIMIZED BY THE FUNCTIONAL
PARAMETERS AIMED TO ENSURE A SELF-CALIBRATION»**

Таблица 2

Результаты модального анализа ЧЭ МЭМС-акселерометра

Форма колебаний (мода) <i>The form of oscillation (mode)</i>	Частота, Гц <i>Frequency, Hz</i>	Форма колебаний (мода) <i>The form of oscillation (mode)</i>	Частота, Гц <i>Frequency, Hz</i>
 1-я мода <i>1st mode</i>	876.86	 2-я мода <i>2st mode</i>	19340
 3-я мода <i>3st mode</i>	21317	 4-я мода <i>4st mode</i>	23852
 5-я мода <i>5st mode</i>	38871	 6-я мода <i>6st mode</i>	47755