

ISSN 1813-8586

НАНО-И МИКРОСИСТЕМНАЯ ТЕХНИКА

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

Том 23, № 3, 2021



17-Я СПЕЦИАЛИЗИРОВАННАЯ ВЫСТАВКА
ТОЧНЫЕ ИЗМЕРЕНИЯ — ОСНОВА КАЧЕСТВА И БЕЗОПАСНОСТИ

MetrolExpo'2021

18–20 октября



ТЕМАТИКА ВЫСТАВКИ:

МЕТРОЛОГИЯ
ИЗМЕРЕНИЯ
ИСПЫТАНИЯ И АНАЛИТИКА
ДИАГНОСТИКА И КОНТРОЛЬ
ПРОМЫШЛЕННАЯ АВТОМАТИЗАЦИЯ

В РАМКАХ РОССИЙСКОЙ ПРОМЫШЛЕННОЙ НЕДЕЛИ

Синергия 6-и выставок
19.000 посетителей
600 участников
Экспозиция 17.000 м²

ВК «ВЭТСТРОЙ ЭКСПО»
Телефон: +7 (495) 937-40-23
E-mail: metrol@expoprom.ru
www.metrol.expoprom.ru



НАНО- и МИКРОСИСТЕМНАЯ ТЕХНИКА

Том 23. № 3 ✧ 2021

ЕЖЕМЕСЯЧНЫЙ МЕЖДИСЦИПЛИНАРНЫЙ ТЕОРЕТИЧЕСКИЙ И ПРИКЛАДНОЙ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ

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

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

Журнал включен в Перечень международных реферируемых баз данных по научному направлению 02.00.00 химические науки

и в Перечень научных и научно-технических изданий ВАК России по научным направлениям: 01.04.00 физика, 05.27.00 электроника.

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

Статьи имеют DOI

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:

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

Грибов Б. Г., д.х.н., чл.-кор. РАН

Квардаков В. В., д.ф.-м.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

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

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

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

Редакционная коллегия:

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

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

Астахов М. В., д.х.н., проф.

Бакланов М. Р., д.х.н., проф. (Китай)

Басаев А. С., к.ф.-м.н.

Викулин В. В., к.х.н., д.т.н., проф.

Дайнеко А. В., к.х.н.

Кальнов В. А., к.т.н.

Карякин А. А., д.х.н., проф.

Кузнецов В. И., д.т.н. (Нидерланды)

Леонович Г. И., д.т.н., проф.

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

Панич А. Е., д.т.н., проф.

Пожела К., д.ф.-м.н. (Литва)

Рыжий М. В., д.т.н., проф. (Япония)

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

Сингх К., к.т.н. (Индия)

Телец В. А., д.т.н., проф.

Тимошенко С. П., д.т.н.

Хабибуллин Р. А., к.ф.-м.н., доц.

Шашкин В. И., д.ф.-м.н., проф.

Шубарев В. А., д.т.н., проф.

Редакция:

Антонов Б. И. (директор изд-ва)

Лысенко А. В. (отв. секретарь)

Чугунова А. В. (науч. ред.)

Шетинкин Д. А. (сайт)

СОДЕРЖАНИЕ

НАНОТЕХНОЛОГИИ

Барулина М. А., Кондратов Д. В., Галкина С. А. Аналитическое решение уравнений движения чувствительного элемента наносенсора как прямоугольной свободно опертой нанопластины 115

Крупкин Е. И., Аверин И. А., Пронин И. А., Игошина С. Е., Карманов А. А. Квантово-размерные эффекты в нанокompозитах оксида цинка как основа для разработки газовых сенсоров нового поколения 122

Ларионов Ю. В. Геометрия структур на основе анизотропного травления в нанодиапазоне 131

МОДЕЛИРОВАНИЕ И КОНСТРУИРОВАНИЕ МНСТ

Койгеров А. С. Лестничные фильтры на вытекающих поверхностных акустических волнах на подложке ниобата лития 139

МАТЕРИАЛОВЕДЧЕСКИЕ И ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ МНСТ

Александров П. А., Баранова Е. К., Бударрагин В. В., Литвинов В. Л. Размерный эффект в кремнии, облученном собственными ионами 148

ЭЛЕМЕНТЫ МНСТ

Михеев А. В., Анчутин С. А., Кочурин Е. С., Тимошенко А. С. Применение вариации Аллана для оценки случайных погрешностей датчиков угловой скорости 153

Мустафаева Д. Г. Формирование эффективных микропленочных преобразователей с воспроизводимыми параметрами 157

ПРИМЕНЕНИЕ МНСТ

Присянник В. В., Прудников Н. В., Суворов И. С., Паршиков Б. Ю., Дюбанов М. В. О высокотемпературных гальванических элементах резервных источников тока на основе энергетических конденсированных систем 162

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

ПОДПИСКА:

по каталогу "Пресса России" (индекс 27849)

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

Адрес для переписки:

107076, Москва,

Стромынский пер., д. 4

e-mail: nmst@novtex.ru

Учредитель:

Издательство "Новые технологии"

NANO- and MICROSYSTEMS TECHNOLOGY

(Title "NANO- I MIKROSISTEMNAYA TEKHNIKA")

ISSN 1813-8586 DOI: 10.17587/issn1813-8586

Vol. 23

No. 3

2021

CHIEF EDITOR

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

DEPUTY CHIEF EDITOR

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

DEPUTY CHIEF EDITOR

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

Editorial council:

Aseev A. L., Dr. Sci. (Phys.-Math.), Prof., Acad. RAS
 Chaplygin Ju. A., Dr. Sci. (Tech.), Prof., Acad. RAS
 Gribov B. G., Dr. Sci. (Chem.), Cor.-Mem. RAS
 Kovalchuk M. V., Dr. Sci. (Phys.-Math.), Prof., Cor.-Mem. RAS
 Kuljchin Yu. N., Dr. Sci. (Phys.-Math.), Prof., Acad. RAS
 Kvardakov V. V., 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
 Ryzhii V. I., Dr. Sci. (Phys.-Math.), Prof., Cor.-Mem. RAS
 Saurov A. N., Dr. Sci. (Tech.), Prof., Acad. RAS
 Shevchenko V. Ya., Dr. Sci. (Chem.), Prof., Acad. RAS
 Sigov A. S., Dr. Sci. (Phys.-Math.), Prof., Acad. RAS

Editorial board:

Abramov I. I. (Belorussia), Dr. Sci. (Phys.-Math.), Prof.
 Andreev A. (UK), Cand. Sci. (Phys.-Math.), Prof.
 Astahov M. V., Dr. Sci. (Chem.), Prof.
 Baklanov M. R., Dr. Sci. (Chem.), Prof. (China)
 Basaev A. S., Cand. Sci. (Phys.-Math.)
 Dayneko A. V., Cand. Sci. (Tech.)
 Kalnov V. A., Cand. Sci. (Tech.)
 Karjakin A. A., Dr. Sci. (Chem.), Prof.
 Khabibullin R. A., Cand. Sci. (Phys.-Math.), Ass. Prof.
 Kuznetsov V. I., Dr. Sci. (Tech.) (Netherlands)
 Leonovich G. I., Dr. Sci. (Tech.), Prof.
 Panich A. E., Dr. Sci. (Tech.), Prof.
 Panin G. N., PhD, Prof. (South Korea)
 Pozhela K. (Lithuania), Dr. Sci. (Phys.-Math.)
 Ryzhii M. V., (Japan), Dr. Eng., Prof.
 Santos E. J. P., PhD, Prof. (Brasil)
 Shubarev V. A., Dr. Sci. (Tech.), Prof.
 Shashkin V. I., Dr. Sci. (Phys.-Math.), Prof.
 Singh K., PhD (India)
 Telets V. A., Dr. Sci. (Tech.), Prof.
 Timoshenkov S. P., Dr. Sci. (Tech.)
 Vikulin V. V., Cand. Chem. Sci., Dr. Sci. (Tech.), Prof.

Editorial staff:

Antonov B. I. (Director Publ.)
 Lysenko A. V. (Executive secretary)
 Chugunova A. V. (Research Editor)
 Shchetinkin D. A. (site)

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

CONTENTS

NANOTECHNOLOGY

- Barulina M. A., Kondratov D. V., Galkina S. A.** Analytical Solution of the Equations of Motion of the Sensing Element of Nano-Sensor as a Rectangular Rigidly Fixed Nano-Plate 115
- Krupkin E. I., Averin I. A., Pronin I. A., Igoshina S. E., Karmannov A. A.** Quantum-Dimensional Effects in Zinc Oxide Nanocomposites as Basis for Design of New Generation Gas Sensors 122
- Larionov Yu. V.** Geometry of Structures Developed by Anisotropic Etching in the Nanometer Range 131

MODELLING AND DESIGNING OF MNST

- Koigerov A. S.** Ladder Type of Leaky Surface Acoustic Waves Filters on Substrate of Lithium Niobate 139

SCIENCE OF MATERIALS AND TECHNOLOGICAL BASICS OF MNST

- Aleksandrov P. A., Baranova E. K., Budaragin V. V., Litvinov V. L.** Size Effect in Silicon Irradiated with Self Ions 148

MICRO- AND NANOSYSTEM TECHNIQUE ELEMENTS

- Mihev A. V., Anchutin S. A., Kochurina E. S., Timoshenkov A. S.** The Use of Allan Variation in the Study of the Random Errors of Angular Rate Sensors 153
- Mustafaeva D. G.** Formation of Efficient Microfilm Converters with Reproducible Parameters 157

APPLICATION OF MNST

- Prosyanyuk V. V., Prudnikov N. V., Suvorov I. S., Parshikov B. Yu., Dyubanov M. V.** On High-Temperature Galvanic Elements of Stand-by Power Supply Sources based on Energy Condensed Systems 162

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

М. А. Барулина, д-р физ.-мат. наук, зав. лабораторией, e-mail: marina@barulina.ru
Д. В. Кондратов, д-р физ.-мат. наук, гл. науч. сотр., **С. А. Галкина**, науч. сотр.,
 Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт проблем
 точной механики и управления Российской академии наук (ИПТМУ РАН), г. Саратов

АНАЛИТИЧЕСКОЕ РЕШЕНИЕ УРАВНЕНИЙ ДВИЖЕНИЯ ЧУВСТВИТЕЛЬНОГО ЭЛЕМЕНТА НАНОСЕНСОРА КАК ПРЯМОУГОЛЬНОЙ СВОБОДНО ОПЕРТОЙ НАНОПЛАСТИНЫ

Поступила в редакцию 16.02.2021

Получено аналитическое решение уравнения движения в перемещениях чувствительного элемента наноэлектромеханического датчика. Уравнения движения были получены с использованием динамического принципа виртуальных перемещений, теории изгиба пластин третьего порядка и модифицированной теории парных напряжений. Компоненты вектора перемещения и линейный размеры пластины были нормированы значением высоты пластины. Чувствительный элемент наносенсора рассматривался как размерно-зависимая ортотропная пластина, свободно опертая по краям и находящаяся под действием распределенной нагрузки. Прогиб пластины представлялся в виде двойного тригонометрического ряда.

Полученные результаты были сопоставлены с результатами численного моделирования микропластин, проведенного в одном из широко известных комплексов конечно-элементного моделирования. Был проведен анализ влияния на деформацию нанопластины размерно-зависимых параметров.

Ключевые слова: наноэлектромеханические системы, математическая модель, аналитическое решение, теория изгиба пластин третьего порядка, размерно-зависимые объекты, модифицированная теория парных напряжений, наносенсоры

Введение

Наносенсоры — новый класс сверхмалых приборов, основанных на различных принципах действия и имеющих различное назначение [1—8]. К наносенсорам относят как устройства, размеры которых составляют несколько нанометров, так и микродатчики, имеющие компоненты, существенные для их функций, размеры которых не превышают 100 нм [9].

Одной из проблем при моделировании динамики наноразмерных компонентов является то, что применение классических теорий упругости ограничено, так как нарушаются основные гипотезы этих теорий, например гипотеза сплошности. Для адаптации классических теорий к изучению динамики наноразмерных объектов был разработан ряд теорий, в которых вводили дополнительные размерно-зависимые параметры,

характеризующие в том числе неоднородность распределения материала. Одна из последних теорий, которая получила достаточно широкое распространение, это новая модифицированная теория парных напряжений, которая была разработана W. Chen и X. Li [10]. Она содержит три параметра масштаба длины материала. Основные соотношения между напряжениями и деформациями, согласно этой теории, имеют вид:

$$\begin{aligned}\sigma_{ij} &= \tilde{C}_{ijkl} \varepsilon_{kl}; \\ m_{ij} &= l_i^2 G_i \chi_{ij} + l_j^2 G_j \chi_{ji}; \\ \varepsilon_{ij} &= \frac{1}{2} (u_{i,j} + u_{j,i}); \\ \chi_{ij} &= \omega_{i,j}, \quad \omega_i = \frac{1}{2} e_{ijk} u_{k,j}\end{aligned}\tag{1}$$

где \tilde{C}_{ijkl} , G_i — упругие константы; σ , ε — тензоры напряжений и деформаций соответственно; l_i — размерно-зависимый параметр материала; χ -тензор кривизны (градиента вращения); m — тензор моментов парных напряжений; u — тензор перемещений; e — символ перестановки (символ Леви-Чивиты).

Эта теория была использована для анализа деформаций нанобалок и нанопластин, описываемых теорией изгиба первого порядка, например, в работах [11–15]. Но в ряде случаев, например, когда нанопластина или нанобалка работает как высокочастотный резонатор [16–18], необходимо использовать теорию изгиба третьего порядка.

Ранее в работе [19] авторы получили уравнения движения нанопластины, используя теорию изгиба третьего порядка и новую модифицированную теорию изгиба пластин. В этой статье получено аналитическое решение системы дифференциальных уравнений, приведенных в [19], в случае свободно опертой по краям нанопластины.

Постановка задачи

Рассмотрим прямоугольную ортотропную нанопластину толщиной h (рис. 1), находящуюся под действием распределенной нагрузки, приложенной на верхнюю грань пластины ($x_3 = -h/2$).

Начало системы координат положим в центре левой грани нанопластины. Оси x_1 , x_2 направлены по длине и ширине пластины, соответственно. Длина пластины — L_1 , ширина пластины — L_2 . Положительное направление оси x_3 — вниз от срединной плоскости по толщине пластины. Таким образом, координаты произвольной точки срединной плоскости имеют вид $(x_1, x_2, 0)$. Плот-

ность ρ_0 пластины принимаем однородной, не изменяющейся по толщине или длине пластины.

Согласно теории пластин Тимошенко — Миндлина, перемещение (u_1, u_2, u_3) любой точки P пластины может быть записано в следующем виде:

$$\begin{aligned} u_1(x_1, x_2, x_3, t) &= u_0(x_1, x_2, t) + x_3\phi_1(x_1, x_2, t) - \\ &- \frac{4}{3h^2}x_3^3\left(\phi_1(x_1, x_2, t) + \frac{\partial w_0(x_1, x_2, t)}{\partial x_1}\right); \\ u_2(x_1, x_2, x_3, t) &= v_0(x_1, x_2, t) + x_3\phi_2(x_1, x_2, t) - \\ &- \frac{4}{3h^2}x_3^3\left(\phi_2(x_1, x_2, t) + \frac{\partial w_0(x_1, x_2, t)}{\partial x_2}\right); \\ u_3(x_1, x_2, x_3, t) &= w_0(x_1, x_2, t), \end{aligned} \quad (2)$$

где (u_0, v_0, w_0) — компоненты вектора перемещения точки срединной поверхности по координатным осям (x_1, x_2, x_3) ; ϕ_1 и ϕ_2 — углы поворота поперечного сечения пластины, к которому принадлежит точка P , относительно осей x_2 и x_1 , соответственно.

Подробный вывод уравнений движения был представлен в работе [19]. Перейдем в полученных уравнениях к безразмерным переменным согласно формулам

$$\bar{u}_i = \frac{u_i}{h}; \quad \bar{x}_i = \frac{x_i}{h}, \quad i = 1, 2, 3,$$

где u_i — компоненты вектора перемещения произвольной точки нанопластины, определяющиеся согласно теории пластин третьего порядка выражениями (2); x_i — координаты.

Безразмерные длина и ширина пластины будут равны соответственно $\bar{L}_i = L_i/h$.

Тогда соотношения (1) в безразмерном виде примут следующий вид:

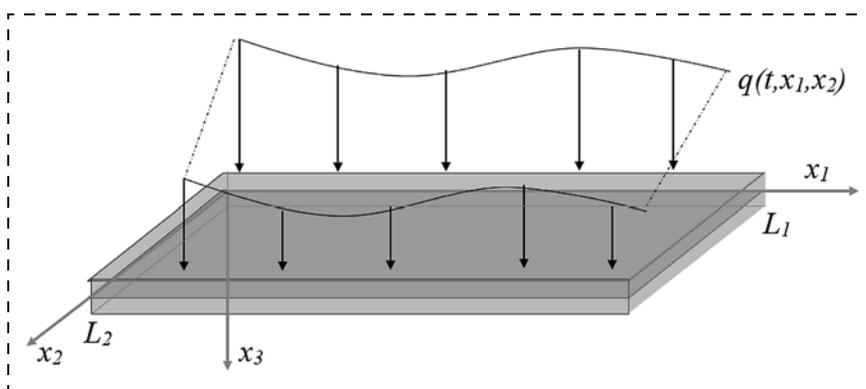


Рис. 1. Нанопластина с системой координат и приложенной нагрузкой

$$\begin{aligned} \bar{u}_1 &= \bar{u}_0 + \bar{x}_3\phi_1 - \\ &- \frac{4}{3}\bar{x}_3^3(\phi_1 + \bar{w}_{0,1}); \\ \bar{u}_2 &= \bar{v}_0 + \bar{x}_3\phi_2 - \\ &- \frac{4}{3}\bar{x}_3^3(\phi_2 + \bar{w}_{0,2}); \\ \bar{u}_3 &= \bar{w}_0, \end{aligned} \quad (3)$$

где $\bar{w}_{0,i} = \frac{\delta \bar{w}_0}{\delta \bar{x}_i \bar{x}_i}$.

Тогда уравнения в безразмерных переменных будут иметь вид (для сокращения записи черта над переменными опущена):

$$h^2 \rho_0 \ddot{u}_0 = C_{11} u_{0,11} + C_{44} u_{0,22} + (C_{44} + C_{12}) v_{0,12} - k_0 u_{0,2222} - k_0 u_{0,1122} + k_0 v_{0,1112} + k_0 v_{0,1222}; \quad (4.1)$$

$$h^2 \rho_0 \ddot{v}_0 = (C_{44} + C_{12}) u_{0,12} + C_{44} u_{0,11} + C_{22} v_{0,22} + k_0 u_{0,1112} + k_0 u_{0,1222} - k_0 v_{0,1111} - k_0 v_{0,1122}; \quad (4.2)$$

$$1260q + 1260h^2 \rho_0 \ddot{w}_0 - 5h^2 \rho_0 \ddot{w}_{0,11} - 5h^2 \rho_0 \ddot{w}_{0,22} + 16h^2 \rho_0 \ddot{\phi}_{1,1} + 16h^2 \rho_0 \ddot{\phi}_{2,2} = g_1 w_{0,1111} + g_{12} w_{0,1122} + g_2 w_{0,2222} + 4k_5 w_{0,11} + 4k_4 w_{0,22} + 4k_2 \phi_{1,111} + 4d_2 \phi_{1,122} + 4d_1 \phi_{2,112} + 4k_3 \phi_{2,222} + 4k_4 \phi_{2,2} + 5k_5 \phi_{1,1}; \quad (4.3)$$

$$17h^2 \rho_0 \ddot{\phi}_1 - 4h^2 \rho_0 \ddot{w}_{0,1} = -k_1 \phi_{1,2222} - k_1 \phi_{1,1122} + k_1 \phi_{2,1112} + k_1 \phi_{2,1222} + a_2 \phi_{1,11} + a_{23} \phi_{1,22} + k_6 \phi_{2,12} - k_5 \phi_1 - k_2 w_{0,111} - b_{12} w_{0,122} - k_5 w_{0,1}; \quad (4.4)$$

$$17h^2 \rho_0 \ddot{\phi}_2 - 4h^2 \rho_0 \ddot{w}_{0,2} = k_1 \phi_{1,1112} + k_1 \phi_{1,1222} - k_1 \phi_{2,1111} - k_1 \phi_{2,1122} + k_6 \phi_{1,12} + a_1 \phi_{2,22} + a_{13} \phi_{2,11} - k_4 \phi_2 - b_{21} w_{0,112} - k_3 w_{0,222} - k_4 w_{0,2}; \quad (4.5)$$

где $\tilde{C} = (C_{12} + 2C_{44})$, $\xi_{ij} = \xi_i + \xi_j$, $\xi_i = l_i^2 G_i$,
 $k_0 = \frac{1}{4} h^2 \xi_3$, $k_1 = \frac{17}{4} h^2 \xi_3$, $k_2 = 4C_{11} + 63h^2 \xi_2$,
 $k_3 = 4C_{22} + 63h^2 \xi_1$, $k_4 = 84(2C_{55} + 5h^2 \xi_1)$,
 $k_5 = 84(2C_{66} + 5h^2 \xi_2)$, $k_6 = 17(C_{44} + C_{12}) - 42h^2 \xi_3$,
 $g_1 = -(5C_{11} + 588h^2 \xi_2)$, $g_2 = -(5C_{22} + 588h^2 \xi_1)$,
 $g_{12} = -2(5\tilde{C} + 294h^2 \xi_{12})$, $d_i = 4\tilde{C} + 63h^2 \xi_i$,
 $a_1 = 17C_{22} + 42h^2 \xi_1$, $a_2 = 17C_{11} + 42h^2 \xi_2$,
 $a_{13} = 17C_{44} + 42h^2 \xi_{13}$, $a_{23} = 17C_{44} + 42h^2 \xi_{23}$,
 $b_{12} = 4\tilde{C} + 21h^2(5\xi_1 - 8\xi_2)$,
 $b_{21} = 4\tilde{C} + 21h^2(8\xi_1 - 5\xi_2)$.

Для ортотропного материала упругие константы G_i в соотношениях (1) задаются следующим образом [20]:

$$G_1 = G_{13}, \quad G_2 = G_{23}, \quad G_3 = G_{12},$$

где G_{ij} — модуль сдвига.

Систему уравнений (4.1)—(4.6) необходимо дополнить начальными и граничными условиями. Для случая свободного опирания граничные условия будут иметь вид:

$$x_1 = 0, \quad x_1 = L_1: \quad u_0 = w_0 = \phi_2 = 0, \quad N_{xx} = \Phi_{xx} = 0; \\ x_2 = 0, \quad x_2 = L_2: \quad v_0 = w_0 = \phi_1 = 0, \\ N_{yy} = \Phi_{yy} = 0, \quad (5)$$

где выражения для N_{xx} , Φ_{xx} , N_{yy} , Φ_{yy} определяются из естественных граничных условий и имеют вид:

$$N_{xx} = N_{nn}, \quad \Phi_{xx} = \Phi_{nn} \quad \text{при } n_1 = \pm 1, \quad n_2 = 0;$$

$$N_{yy} = N_{nn}, \quad \Phi_{yy} = \Phi_{nn} \quad \text{при } n_1 = 0, \quad n_2 = \pm 1;$$

$$N_{nn} = [n_1^2 \quad n_2^2 \quad 2n_1 n_2] [N_{11} \quad N_{22} \quad N_{12}]^T;$$

$$\Phi_{nn} = [n_1^2 \quad n_2^2 \quad 2n_1 n_2] [N_{11} \quad N_{22} \quad N_{12}]^T +$$

$$+ [-n_1 n_2 \quad n_1 n_2 \quad 0 \quad n_1^2 - n_2^2] \times$$

$$\times \left(\frac{1}{2} [N_{11}^x \quad N_{22}^x \quad N_{33}^x \quad N_{12}^x \quad N_{13}^x]^T - \right.$$

$$\left. - 2 [R_{11}^x \quad R_{22}^x \quad R_{33}^x \quad R_{12}^x \quad R_{13}^x]^T \right) +$$

$$+ (n_1 + n_2) \left(\frac{1}{2} M_{13}^x - \frac{2}{3} P_{13}^x \right)_{,1} +$$

$$+ (n_1 - n_2) \left(\frac{1}{2} M_{23}^x - \frac{2}{3} P_{23}^x \right)_{,2},$$

$$\text{где } N_{ij} = \int_{-\frac{h}{2}}^{\frac{h}{2}} \sigma_{ij} dx_3, \quad M_{ij} = \int_{-\frac{h}{2}}^{\frac{h}{2}} x_3 \sigma_{ij} dx_3, \quad R_{ij} = \int_{-\frac{h}{2}}^{\frac{h}{2}} x_3^2 \sigma_{ij} dx_3,$$

$$P_{ij} = \int_{-\frac{h}{2}}^{\frac{h}{2}} x_3^3 \sigma_{ij} dx_3; \quad N_{ij}^x = \int_{-\frac{h}{2}}^{\frac{h}{2}} m_{ij} dx_3, \quad M_{ij}^x = \int_{-\frac{h}{2}}^{\frac{h}{2}} x_3 m_{ij} dx_3,$$

$$R_{ij}^x = \int_{-\frac{h}{2}}^{\frac{h}{2}} x_3^2 m_{ij} dx_3, \quad P_{ij}^x = \int_{-\frac{h}{2}}^{\frac{h}{2}} x_3^3 m_{ij} dx_3; \quad l_i = \int_{-\frac{h}{2}}^{\frac{h}{2}} \rho_0 x_3^i dx_3.$$

Аналитическое решение

Будем искать решение системы (4.1)—(4.5) в виде двойных тригонометрических рядов:

$$u_0 = \sum_{n=1}^{\infty} \sum_{m=1}^{\infty} U_{nm}(t) \cos(\alpha_n x_1) \sin(\beta_m x_2); \quad (6.1)$$

$$v_0 = \sum_{n=1}^{\infty} \sum_{m=1}^{\infty} V_{nm}(t) \sin(\alpha_n x_1) \cos(\beta_m x_2); \quad (6.2)$$

$$w_0 = \sum_{n=1}^{\infty} \sum_{m=1}^{\infty} W_{nm}(t) \sin(\alpha_n x_1) \sin(\beta_m x_2); \quad (6.3)$$

$$\phi_1 = \sum_{n=1}^{\infty} \sum_{m=1}^{\infty} \Psi_{1nm}(t) \cos(\alpha_n x_1) \sin(\beta_m x_2); \quad (6.4)$$

$$\phi_2 = \sum_{n=1}^{\infty} \sum_{m=1}^{\infty} \Psi_{2nm}(t) \sin(\alpha_n x_1) \cos(\beta_m x_2); \quad (6.5)$$

$$\alpha_n = n\pi/\bar{L}_1, \quad \beta_m = m\pi/\bar{L}_2.$$

Функции (6.1)—(6.5) автоматически удовлетворяют граничным условиям (5).

Распределенную нагрузку q также необходимо представить в виде двойного ряда:

$$q = \sum_{n=1}^{\infty} \sum_{m=1}^{\infty} Q_{nm}(t) \sin(\alpha_n x_1) \sin(\beta_m x_2), \quad (7)$$

где $Q_{nm}(t)$ находим по следующей формуле:

$$Q_{nm}(t) = \frac{4}{ab} \int_{-L_2/2}^{L_2/2} \int_0^{L_1} q \sin(\alpha_n x_1) \sin(\beta_m x_2) dx_1 dx_2.$$

Подставляя функции (6.1)—(6.5), (7) в (4.1)—(4.5), получим систему уравнений, которая в матричном виде имеет вид:

$$A \frac{\partial^2}{\partial t^2} V = -IQ + BV, \quad (8)$$

где $V = (U_{nm} \ V_{nm} \ W_{nm} \ \Psi_{1nm} \ \Psi_{2nm})^T$, I — единичная матрица 5×5 , $Q = (0 \ 0 \ 1260 \ Q_{nm} \ 0 \ 0)^T$ — вектор внешнего воздействия, ненулевые компоненты матриц A и B определяются выражениями:

$$\begin{aligned} A_{11} &= A_{22} = \rho_0 h^2, \quad A_{33} = 5h^2(\rho_0(\alpha_n^2 + \beta_m^2) + 252), \\ A_{44} &= A_{55} = 17\rho_0 h^2, \quad A_{43} = -4\rho_0 \alpha_n h^2, \\ A_{53} &= -4\rho_0 \beta_m h^2, \quad A_{34} = 4A_{43}, \quad A_{35} = 4A_{53}, \\ B_{11} &= -k_0 \beta_m^2 (\alpha_n^2 + \beta_m^2) - C_{11} \alpha_n^2 - C_{44} \beta_m^2, \\ B_{22} &= -k_0 \alpha_n^2 (\alpha_n^2 + \beta_m^2) - C_{44} \alpha_n^2 - C_{22} \beta_m^2, \\ B_{12} &= B_{21} = \alpha_n \beta_m [k_0(\alpha_n^2 + \beta_m^2) - (C_{12} + C_{44})], \\ B_{33} &= (g_1 \alpha_n^2 - 4k_5) \alpha_n^2 + g_{12} \alpha_n^2 \beta_m^2 + \\ &+ (g_2 \beta_m^2 - 4k_4) \beta_m^2, \end{aligned} \quad (9)$$

$$B_{44} = -(\alpha_n^2 + \beta_m^2) k_1 \beta_m^2 - (\alpha_2 \alpha_n^2 + \alpha_{23} \beta_m^2 + k_5),$$

$$B_{55} = -(\alpha_n^2 + \beta_m^2) k_1 \alpha_n^2 - (\alpha_{13} \alpha_n^2 + \alpha_1 \beta_m^2 + k_4),$$

$$B_{34} = \alpha_n (4k_2 \alpha_n^2 + 4d_2 \beta_m^2 - 5k_5),$$

$$B_{43} = \alpha_n (k_2 \alpha_n^2 + b_{12} \beta_m^2 - k_5),$$

$$B_{35} = 4\beta_m (d_1 \alpha_n^2 + k_3 \beta_m^2 - k_4),$$

$$B_{53} = \beta_m (b_{21} \alpha_n^2 + k_3 \beta_m^2 - k_4),$$

$$B_{45} = B_{54} = \alpha_n \beta_m (k_1 \alpha_n^2 + k_1 \beta_m^2 - k_6).$$

Система уравнений (8) имеет достаточно простой вид и аналитическое решение. Необходимо отметить, что систему (8) необходимо построить и решить для всех индексов n и m .

Моделирование и анализ результатов

Решение математической модели (4.1)—(4.5) в виде двойных тригонометрических рядов (6.1)—(6.5) было реализовано в среде математических вычислений Maple. На первом этапе была проведена верификация алгоритма решения, для чего получаемые результаты моделирования сопоставляли с результатами моделирования в программе конечно-элементного моделирования ANSYS.

Моделирование проводили на пластине со следующими параметрами: $\rho = 1840 \text{ кг/м}^3$; $h = 5 \cdot 10^{-8} \text{ м}$; $L_1 = 2 \cdot 10^{-6} \text{ м}$; $L_2 = 1 \cdot 10^{-6} \text{ м}$; $E_1 = 2,04 \cdot 10^{10} \text{ Па}$; $E_2 = 1,84 \cdot 10^{10} \text{ Па}$; $E_3 = 1,5 \cdot 10^{10} \text{ Па}$; $G_{12} = 9,2 \cdot 10^9 \text{ Па}$; $G_{23} = 8,4 \cdot 10^9 \text{ Па}$; $G_{13} = 6,6 \cdot 10^9 \text{ Па}$; $\nu_{12} = 0,11$; $\nu_{13} = 0,14$; $\nu_{23} = 0,09$.

Результат моделирования в безразмерных переменных в разработанном алгоритме показан на рис. 2 (см. третью сторону обложки). Максимальный прогиб пластины имеет место в ее центре и равен $5,0397 \cdot 10^{-9} \text{ м}$. Максимальный прогиб пластины согласно расчету в ANSYS составил $5,0823 \cdot 10^{-9} \text{ м}$. Таким образом, погрешность полученного решения составила менее 0,8 %.

На втором этапе исследовали влияние размерно-зависимых параметров материала l_i на изгиб нанопластины (рис. 3). Из анализа коэффициентов, содержащих $\xi_i = l_i^2 G_i$, следует, что l_i должно иметь порядок, не меньший, чем величина $\frac{1}{h}$.

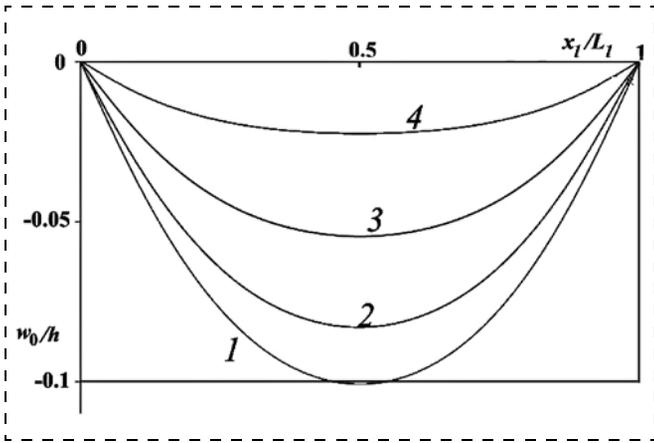


Рис. 3. Прогиб срединной плоскости пластины, $x_2 = L_2/2$.

1 – $l_1 = 0$; 2 – $l_1 = \frac{1}{4h}$; 3 – $l_1 = \frac{1}{2h}$; 4 – $l_1 = \frac{1}{h}$

В результате моделирования были построены кривые прогиба срединной плоскости пластины при $x_2 = L_2/2$ при различных значениях параметра $l_1 = 0, \frac{1}{4h}, \frac{1}{2h}, \frac{1}{h}$.

При $l_1 = 0$ имеем решение, которое совпадает с классическим решением для свободно опертой пластины Тимошенко – Миндлина. Значения максимальных прогибов и сравнение их с номинальным (при $l_1 = 0$) значением приведены в таблице.

Как видно из таблицы и графиков на рис. 3, на прогиб пластины существенно влияет значение размерно-зависимых параметров. Так, с ростом l_1 прогиб пластины уменьшается на более чем 17 % уже при $l_1 = \frac{1}{4h}$. При $l_1 = \frac{1}{h}$ прогиб пластины уменьшился более чем на 77 %. Зависимость прогиба пластины от размерно-зависи-

Значения максимальных прогибов и сравнение их с номинальным значением

l_1	$\frac{w_0}{h}$	$w_0, \text{ м}$	$\Delta, \%$
0	0,101	$5,0397 \cdot 10^{-9}$	0
$\frac{1}{4h}$	0,080	$4,164 \cdot 10^{-9}$	17,38
$\frac{1}{2h}$	0,054	$2,728 \cdot 10^{-9}$	45,87
$\frac{1}{h}$	0,023	$1,137 \cdot 10^{-9}$	77,44

мых параметров хорошо коррелирует с аналогичными зависимостями, полученными другими авторами для нанобалок [20].

Заключение

Построено аналитическое решение уравнений движения свободно опертой нанопластины. Уравнения движения нанопластины в перемещениях были получены ранее в рамках теории изгиба пластин третьего порядка и новой модифицированной теории парных напряжений. Компоненты (u_0, v_0, w_0) вектора перемещения точки срединной поверхности и углы поворота ϕ_1 и ϕ_2 поперечного сечения пластины были представлены в виде двойных тригонометрических рядов.

Была проведена верификация построенного решения путем сопоставления полученных результатов расчета с результатами численного моделирования пластин, проведенного в одном из широко известных комплексов конечно-элементного моделирования.

Было показано, что размерно-зависимые параметры будут оказывать заметное влияние на деформированное состояние пластины только в случае, если их порядок будет не менее порядка $\frac{1}{h}$. Проведенные эксперименты показали

сильное влияние размерно-зависимых параметров на деформацию пластины, качественно эта зависимость хорошо коррелирует с зависимостями, полученными ранее другими авторами для нанобалок.

Полученные результаты могут быть использованы для моделирования напряженно-деформированного состояния чувствительных элементов наносенсоров, представляющих собой нанопластину.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ 19-08-00807.

Список литературы

- Schmidt P., Amawi M. T., Pogorzalek S. et al. Side-band-resolved resonator electromechanics based on a nonlinear Josephson inductance probed on the single-photon level // Commun. Phys. 2020. Vol. 3. P. 233.
- Šiškins M., Lee M., Wehenkel D. et al. Sensitive capacitive pressure sensors based on graphene membrane arrays // Microsyst. Nanoeng. 2020. Vol. 6. P. 102.

3. **Wan C., Cai P., Guo X.** et al. An artificial sensory neuron with visual-haptic fusion // *Nat Commun.* 2020. Vol. 11. Art. num. 4602.
4. **Szakmany G. P., Bernstein G. H., Kinzel E. C.** et al. Nanoantenna-based ultrafast thermoelectric long-wave infrared detectors // *Sci. Rep.* 2020. Vol. 10. Akt. num. 13429.
5. **Han Y. Y., Lin Y. C., Cheng W. C.** et al. Rapid antibiotic susceptibility testing of bacteria from patients' blood via assaying bacterial metabolic response with surface-enhanced Raman spectroscopy // *Sci. Rep.* 2020. Vol. 10. Arc. num. 12538.
6. **Sansa M., Defoort M., Brenac A.** et al. Optomechanical mass spectrometry // *Nat. Commun.* 2020. Vol. 11. Arc. num. 3781.
7. **Zhang D., Peng L., Shang X.** et al. Buoyant particulate strategy for few-to-single particle-based plasmonic enhanced nanosensors // *Nat Commun.* 2020. Vol. 11. P. 2603.
8. **Li Z., Jin J., Yang F.** et al. Coupling magnetic and plasmonic anisotropy in hybrid nanorods for mechanochromic responses // *Nat Commun.* 2020. Vol. 11. Akt. num. 2883.
9. **Aseev A. L.** Nanotechnologies: yesterday, today, tomorrow // *First-hand science*, 2008. Vol. 21. N. 3. URL: <https://scfh.ru/en/papers/nanotechnologies-yesterday-today-tomorrow/>
10. **Chen W., Ma X., Li L.** A model of composite laminated Reddy plate based on new modified couple stress theory // *Composite Structures.* 2012. Vol. 94. P. 2143–2156.
11. **Yekani S. M. A., Fallah F., Levy A.** solution for bending, buckling, and vibration of Mindlin micro plates with a modified couple stress theory // *SN Appl. Sci.* 2020. Vol. 2. Iss. 12. Akt. num. 2169.
12. **Tsiatas G. C., Yiotis A. J.** Size effect on the static, dynamic and buckling analysis of orthotropic Kirchhoff-type skew micro-plates based on a modified couple stress theory: comparison with the nonlocal elasticity theory // *Acta Mechanica.* 2015. Vol. 226. Is. 4. P. 1267–1281. Doi: 10.1007/s00707-014-1249-3.
13. **Yang Z., He D.** Vibration and Buckling of Functionally Graded Sandwich Micro-Plates based on a new Size-Dependent Model // *International Journal of Applied Mechanics.* 2019. Vol. 11. N. 1. Art. num. 150004. Doi: 10.1142/s1758825119500042.
14. **Lei J., He Y., Guo S., Li Z., Liu D.** Size-dependent vibration of nickel cantilever microbeams: experiment and gradient elasticity // *AIP Advances.* 2016. Vol. 6. N. 10. P. 105202–105202-7.
15. **Ebrahimi F., Barati M. R.** Hygrothermal effects on vibration characteristics of viscoelastic FG nanobeams based on nonlocal strain gradient theory // *Composite Structures.* 2017. Vol. 159. P. 433–444.
16. **Qian Z., Hui Y., Liu F., Kar S., Rinaldi M.** 245 MHz graphene-aluminum nitride nano plate resonator // 2013 Transducers & Eurosensors XXVII: The 17th International Conference on Solid-State Sensors, Actuators and Microsystems (TRANSDUCERS & EUROSENSORS XXVII), Barcelona, 2013. P. 2005–2008. Doi: 10.1109/Transducers.2013.6627190.
17. **Qian Z., Hui Y., Liu F., Kar S., Rinaldi M.** Chemical sensing based on graphene-aluminum nitride nano plate resonators // *IEEE SENSORS*, Busan, South Korea, 2015, P. 1–4. Doi: 10.1109/ICSENS.2015.7370507.
18. **Nano- and microelectromechanical resonators.** Патент US9935608B1 (United States). <https://patents.google.com/patent/US9935608B1>.
19. **Барулина М. А.** Уравнения движения чувствительного элемента НЭМС-датчика как прямоугольной размерно-зависимой наноластины // *Нано- и микросистемная техника.* 2020. Т. 22, № 3. С. 164–171.
20. **Chen W., Li X.** A new modified couple stress theory for anisotropic elasticity and microscale laminated Kirchhoff plate model // *Arch. Appl. Mech.* 2014. Vol. 84. Is. 3. P. 323–341.

M. A. Barulina, D. Sci., Head of Laboratory, marina@barulina.ru,
D. V. Kondratov, D. Sci., Chief Researcher, **S. A. Galkina**, Researcher,
 Institute of Precision Mechanics and Control of the Russian Academy of Sciences (IPTMU RAS),
 Saratov, 410028, Russian Federation

Corresponding author:

Barulina Marina A., D. Sci., Head of Laboratory, Institute of Precision Mechanics and Control of the Russian Academy of Sciences (IPTMU RAS), Saratov, 410028, Russian Federation
 E-mail: marina@barulina.ru

Analytical Solution of the Equations of Motion of the Sensing Element of Nano-Sensor as a Rectangular Rigidly Fixed Nano-Plate

Received on February 16, 2021

Accepted on March 16, 2021

In this paper, an analytical solution of the equation of motion in the displacements of the sensing element of a nanoelectromechanical sensor is obtained. The equations of motion were obtained using the dynamic principle of virtual displacements, the third-order plate bending theory, and a new modified couple stress theory. The components of the displacement vector and the linear dimensions of the plate normalized by the value of the plate's height. The sensitive element of the nanosensor was considered as a size-dependent orthotropic plate, simply supported at the edges and under the distributed load. The deflection of the plate is represented as a double trigonometric series.

The obtained results were compared with the results of numerical modeling of microplates, carried out in one of the well-known finite element modeling software. Also in work, the influence of size-dependent parameters on the deformation of the nanoplate was analyzed.

Keywords: nanoelectromechanical systems, a mathematical model, analytical solution, third-order plate bending theory, size-dependent objects, modified theory of paired stresses, nanosensors

For citation:

Barulina M. A., Kondratov D. V., Galkina S. A. Analytical Solution of the Equations of Motion of the Sensing Element of Nano-Sensor as a Rectangular Rigidly Fixed Nano-Plate, *Nano- i mikrosistemnaya tekhnika*, 2021, vol. 23, no. 3, pp. 115–121.

DOI: 10.17587/nmst.23.115-121

References

1. Schmidt P., T. Amawi M., Pogorzalek S. et al. Side-band-resolved resonator electromechanics based on a nonlinear Josephson inductance probed on the single-photon level, *Commun. Phys.*, 2020, vol. 3, p. 233.
2. Šiškins M., Lee M., Wehenkel D. et al. Sensitive capacitive pressure sensors based on graphene membrane arrays, *Microsyst. Nanoeng.*, 2020, vol. 6, p. 102.
3. Wan C., Cai P., Guo X. et al. An artificial sensory neuron with visual-haptic fusion, *Nat Commun*, 2020, vol. 11, p. 4602.
4. Szakmany G. P., Bernstein G. H., Kinzel E. C. et al. Nanoantenna-based ultrafast thermoelectric long-wave infrared detectors, *Sci. Rep.*, 2020, vol. 10, p. 13429.
5. Han Y. Y., Lin Y. C., Cheng W. C. et al. Rapid antibiotic susceptibility testing of bacteria from patients' blood via assaying bacterial metabolic response with surface-enhanced Raman spectroscopy, *Sci. Rep.*, 2020, vol. 10, p. 12538.
6. Sansa M., Defoort M., Brenac A. et al. Optomechanical mass spectrometry, *Nat Commun*, 2020, vol. 11, p. 3781.
7. Zhang D., Peng L., Shang X. et al. Buoyant particulate strategy for few-to-single particle-based plasmonic enhanced nanosensors, *Nat Commun*, 2020, vol. 11, p. 2603.
8. Li Z., Jin J., Yang F. et al. Coupling magnetic and plasmonic anisotropy in hybrid nanorods for mechanochromic responses, *Nat Commun*, 2020, vol. 11, p. 2883.
9. Aseev A. L. Nanotechnologies: yesterday, today, tomorrow, *First-hand science*, 2008, vol. 21, available at: <https://scfh.ru/en/papers/nanotechnologies-yesterday-today-tomorrow/>
10. Chen W., Ma X., Li L. A model of composite laminated Reddy plate based on new modified couple stress theory, *Composite Structures*, 2012, vol. 94, pp. 2143–2156.
11. Yekani S. M. A., Fallah F., Levy A. solution for bending, buckling, and vibration of Mindlin micro plates with a modified couple stress theory, *SN Appl*, 2020, sci. 2, p. 2169.
12. Tsiatas G. C., Yiotis A. J. Size effect on the static, dynamic and buckling analysis of orthotropic Kirchhoff-type skew micro-plates based on a modified couple stress theory: comparison with the nonlocal elasticity theory, *Acta Mechanica*, 2014, vol. 4 (226), pp. 1267–81. Doi: 10.1007/s00707-014-1249-3.
13. Yang Z., He D. Vibration and Buckling of Functionally Graded Sandwich Micro-Plates based on a new Size-Dependent Model, *International Journal of Applied Mechanics*, 2019. Doi: 10.1142/s1758825119500042.
14. Lei J., He Y., Guo S., Li Z., Liu D. Size-dependent vibration of nickel cantilever microbeams: experiment and gradient elasticity, *AIP Advances*, 2016, vol. 6 (10).
15. Ebrahimi F., Barati M. R. Hygrothermal effects on vibration characteristics of viscoelastic FG nanobeams based on nonlocal strain gradient theory, *Composite Structures*, 2017, vol. 159, pp. 433–444.
16. Qian Z., Hui Y., Liu F., Kar S., Rinaldi M. 245 MHz graphene-aluminum nitride nano plate resonator, 2013 Transducers & Eurosensors XXVII: *The 17th International Conference on Solid-State Sensors, Actuators and Microsystems (TRANSDUCERS & EUROSENSORS XXVII)*, Barcelona, 2013, pp. 2005–2008. Doi: 10.1109/Transducers.2013.6627190.
17. Qian Z., Hui Y., Liu F., Kar S., Rinaldi M. Chemical sensing based on graphene-aluminum nitride nano plate resonators, *IEEE SENSORS, Busan, South Korea*, 2015, pp. 1–4. Doi: 10.1109/ICSENS.2015.7370507.
18. Nano- and microelectromechanical resonators. Patent US9935608B1 (United States). <https://patents.google.com/patent/US9935608B1>.
19. Barulina M. A. Equations of Motion of a NEMS-sensor's Sensing Element as Rectangular Size-Dependent Nanoplate, *Nano- and microsystems technology*, 2020, vol. 22, no. 3, pp. 164–171 (in Russian).
20. Chen W., Li X. A new modified couple stress theory for anisotropic elasticity and microscale laminated Kirchhoff plate model, *Arch. Appl. Mech.*, 2014, vol. 84, pp. 323–341.

Е. И. Крупкин, студент, e-mail: egor.krupkin99@mail.ru,
И. А. Аверин, д-р техн. наук, проф., зав. каф., e-mail: nano-micro@mail.ru,
И. А. Пронин, д-р техн. наук, проф., e-mail: pronin_i90@mail.ru,
С. Е. Игошина, канд. физ.-мат. наук, доц., e-mail: sigoshina@mail.ru,
А. А. Карманов, канд. физ.-мат. наук, доц., e-mail: starosta07km1@mail.ru
ФГБОУ ВО "Пензенский государственный университет"

КВАНТОВО-РАЗМЕРНЫЕ ЭФФЕКТЫ В НАНОКОМПОЗИТАХ ОКСИДА ЦИНКА КАК ОСНОВА ДЛЯ РАЗРАБОТКИ ГАЗОВЫХ СЕНСОРОВ НОВОГО ПОКОЛЕНИЯ

Поступила в редакцию 17.02.2021

Проанализирована возможность использования нанокompозита на основе ультрадисперсного порошка оксида цинка и поливинилового спирта в качестве чувствительного элемента газового сенсора. Показано, что наночастицы оксида цинка с формой, близкой к прямоугольному параллелепипеду, могут выступать в качестве потенциальных ям для свободных электронов, разделенных между собой слоями поливинилового спирта, образующими потенциальные барьеры. Оценен вклад туннельной составляющей в изменение плотности тока, текущего через нанокompозит, с учетом хемосорбции кислорода на наночастицах. На основе результатов численного моделирования показано, что с ростом концентрации атомов кислорода наблюдается смещение пиков на зависимости коэффициента пропускания от энергии электрона и уменьшение плотности туннельного тока. продемонстрированы перспективы использования квантово-размерных эффектов при разработке газовых сенсоров нового поколения, в основе работы которых лежит модуляция проводимости нанокompозита при их взаимодействии с газами-аналитами.

Ключевые слова: оксид цинка, поливиниловый спирт, газовый сенсор, газочувствительность, квантово-размерные эффекты, туннелирование электронов, коэффициент пропускания

Введение

Одним из перспективных направлений развития современной микро- и нанoeлектроники является разработка адсорбционных сенсоров хеморезистивного типа, которые позволяют определять наличие сверхнизких концентраций газов-аналитов или имеют высокий сенсорный отклик на уменьшение давления ниже атмосферного. В настоящее время существует огромное множество такого рода сенсоров с различными принципами работы (электрохимические, полупроводниковые, магнитные, оптические, массочувствительные и другие) [1]. Однако многие из них имеют существенные недостатки — высокая стоимость; сложность технологии изготовления; низкая чувствительность и/или селективность.

Основными материалами, на основе которых разрабатывают газовые сенсоры нового поколения, являются широкозонные металлооксидные материалы, к ним относятся ZnO, TiO₂, SnO₂ и др. [2–7]. Использование данных материалов

обусловлено большой адсорбционной способностью поверхности металлооксидов, в том числе по отношению к атомам кислорода, которые способны вставать на места вакансий кислорода в атомной структуре поверхности. При этом хемосорбция кислорода может приводить к возникновению потенциальных барьеров между отдельными кристаллитами металлоксида. В атмосфере газов-восстановителей (например, этанола, угарного газа и т. д.) зачастую протекает реакция между молекулами газа-аналита и связанным с металлооксидом кислородом, которая обуславливает уменьшение поверхностного заряда и снижение высоты потенциального барьера [8, 9]. В качестве примера такого взаимодействия можно привести реакцию с угарным газом $\text{CO} + \text{O}^- \rightarrow \text{CO}_2 + e^-$.

Современной тенденцией разработки газовых сенсоров на основе широкозонных металлооксидов является использование в качестве чувствительных элементов наноматериалов, включая нанокompозиты и иерархические наноструктуры

[6, 8]. Это обусловлено тем, что изменение электрофизических свойств полупроводников при адсорбции молекул газа сильнее сказывается на кристаллитах с малыми размерами. Если размер наночастицы много меньше длины экранирования Дебая, то весь ее объем оказывается обедненным электронами, и формирование потенциального барьера на каждой межкристаллической границе является маловероятным. В этом случае хемосорбция кислорода приводит к изменению положения уровня Ферми не только в приповерхностной области наночастицы, но и во всем ее объеме. При этом определенную роль начинают играть квантово-размерные эффекты, которые, несмотря на свою слабую выраженность, могут в значительной мере определять сенсорный отклик нанокompозита к газам-аналитам.

На данный момент значительные перспективы в этом направлении исследования продемонстрированы для наноматериалов на основе металлооксидов, синтез которых реализуется по принципу "снизу-вверх", т. е. когда их выращивают с использованием самосборки и самоорганизации (например, с помощью золь-гель-технологии или методом электрохимического осаждения) [10, 11]. Также большой интерес представляют технологии, работающие по принципу "сверху-вниз", согласно которым наноструктурированные материалы создают из макрообъектов путем физического воздействия. В качестве примера можно привести технологию изготовления чувствительного элемента адсорбционного сенсора хеморезистивного типа на основе порошка оксида цинка путем его измельчения до ультрадисперсного состояния с размером частиц 5...30 нм и последующим прессованием [12].

Кроме этого, одной из перспективных, но слабо освоенных методик получения наноматериалов для чувствительных элементов газовых сенсоров является механический размол порошка металлооксида с последующим нанесением его на поверхность непроводящей подложки и формированием контактных площадок. При этом для предотвращения агрегации отдельных частиц и создания нанокompозита используют органические связующие [13—17], например поливиниловый спирт (ПВС). Данная технология позволяет согласно принципу "сверху-вниз" синтезировать наноматериалы с узкой дисперсией наночастиц по размеру без применения операции прессования, что обеспечивает практически полное отсутствие механического контакта между отдельными кристаллитами.

Анализ литературных источников показывает, что вопросы, связанные с газочувствительностью нанокompозитов на основе ультрадисперсных порошков металлооксидов (например, оксида цинка) и связующих, остаются малоизученными. Поэтому целью настоящей работы является оценка перспектив использования квантово-размерных эффектов при создании газовых сенсоров нового поколения, а также разработка модели, учитывающей вклад туннельной составляющей в изменение плотности тока, текущего через нанокompозит, с учетом хемосорбции кислорода на наночастицах и взаимодействия с газами-аналитами.

1. Принципы моделирования

Моделируемая структура нанокompозита и чувствительного элемента газового сенсора на его основе. В общем случае нанокompозиты на основе ультрадисперсных порошков металлооксидов (например, оксида цинка) и связующих (например, ПВС) могут содержать большое число наночастиц, точная оценка которого сильно затруднена, в том числе вследствие их дисперсии по размеру. При этом концентрация кристаллитов может быть оценена равной $10^{17} \dots 10^{19} \text{ см}^{-3}$, что, как будет показано дальше, превосходит концентрацию свободных носителей заряда в ZnO. Далее будем полагать, что толщина формируемого на подложке нанокompозита сопоставима с размером одиночной наночастицы, отдельные кристаллиты механически не контактируют друг с другом, и только малое число наночастиц находится на расстоянии, соизмеримым с длиной волны де Бройля для электронов. В свою очередь, это позволяет при моделировании ограничиться рассмотрением фрагмента нанокompозита, состоящего из малого числа наночастиц металлооксида, разделенных между собой промежутками, которые заполнены связующим. Также будем полагать, что синтезированные наночастицы, полученные методом механического размола, не содержат значительного числа дефектов и имеют близкую к атомарно-гладкой поверхность граней. Отдельно следует отметить, что в общем случае для технологий "сверху-вниз" (включая механический размол) обеспечение данного условия составляет значительную экспериментальную трудность, однако может быть достигнуто за счет дополнительной реконструкции поверхности кристаллитов. Данный факт позволяет считать, что единичные на-

ночастицы имеют форму прямоугольного параллелепипеда и электронные волны слабо рассеиваются на границах кристаллитов. На основе результатов работ [15, 16] при численной оценке будем полагать, что наноккомпозит изготовлен на основе ультрадисперсного порошка оксида цинка и ПВС, при этом размеры единичных наночастиц не превышают 30 нм в любом пространственном направлении (для определенности $10 \times 30 \times 30$ нм). В свою очередь, толщина слоя поливинилового спирта, разделяющего частицы ZnO, составляет $d_{PVA} \approx 2$ нм.

На рис. 1 показана структура моделируемого чувствительного элемента газового сенсора на основе наноккомпозита из поливинилового спирта и ультрадисперсных наночастиц ZnO. Наноккомпозит изготовлен в виде тонкой пленки на поверхности непроводящей подложки, на которой дополнительно сформированы проводящие контактные площадки. На вставке к рис. 1 представлено изображение реальной поверхности наноккомпозита, демонстрирующее характерные особенности расположения отдельных наночастиц, в том числе отсутствие между большинством из них механического контакта. Кристаллиты из оксида цинка, которые находятся под проводящими контактами, практически не контактируют с воздухом и не адсорбируют на своей поверхности молекулы кислорода. В рамках рассматриваемой модели будем полагать, что в исследуемом чувствительном элементе все наночастицы ориентированы вдоль одного пространственного направления, а следовательно, при численной оценке можно считать,

что соответствующий им средний размер вдоль направления переноса носителей заряда составляет $d_{ZnO} \approx 10$ нм.

По результатам исследований электрофизических свойств ультрадисперсного порошка оксида цинка были определены ширина запрещенной зоны $\Delta E_{g1} = 3,34$ эВ и эффективные массы электронов и дырок $m_e^* = 0,28m_0$, $m_h^* = 0,60m_0$, где m_0 — масса покоя электрона [18, 19]. Энергия сродства к электрону собственного ZnO составляет $\chi_{ZnO} = 4,19$ эВ [20], а его относительная диэлектрическая проницаемость $\epsilon = 8,5$ [21]. Поскольку кристаллическая решетка оксида цинка является неидеальной, то в ней присутствует большое число заряженных атомов оксида цинка Zn^+ , Zn^{2+} и вакансий атомов кислорода V_O^\bullet , которые выступают донорами электронов, вследствие чего собственный оксид цинка имеет *n*-тип проводимости. Суммарная концентрация дефектов в нелегированном оксиде цинка составляет $N_D \approx 3,3 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$ [19]. При данной концентрации собственных дефектов уровень Ферми расположен на расстоянии $E_1 \approx 0,1$ эВ от дна зоны проводимости.

На поверхности наноккомпозита на основе поливинилового спирта и ультрадисперсных наночастиц ZnO в воздушной среде адсорбируются атомы различных газов (включая O_2 , CO_2 , пары H_2O и т. д.). При этом важнейшую роль при близких к комнатным температурам играет процесс хемосорбции на наночастицах кислорода, приводящий в данном случае не к изгибу энергетической зоны в приповерхностной области, а к связыванию электронов проводимости и

соответствующему изменению положения уровня Ферми в материале. Это изменение с учетом приближения к форме наночастиц, близкой к прямоугольному параллелепипеду, можно оценить, как изменение напряжения ΔU на плоском конденсаторе при появлении на его обкладке заряда, равного заряду молекулы кислорода в форме O_2^- . Для частицы с размерами $d_{ZnO} = 10$ нм, $a_{ZnO} = b_{ZnO} = 30$ нм изменение напряжения ΔU оценивается по формуле

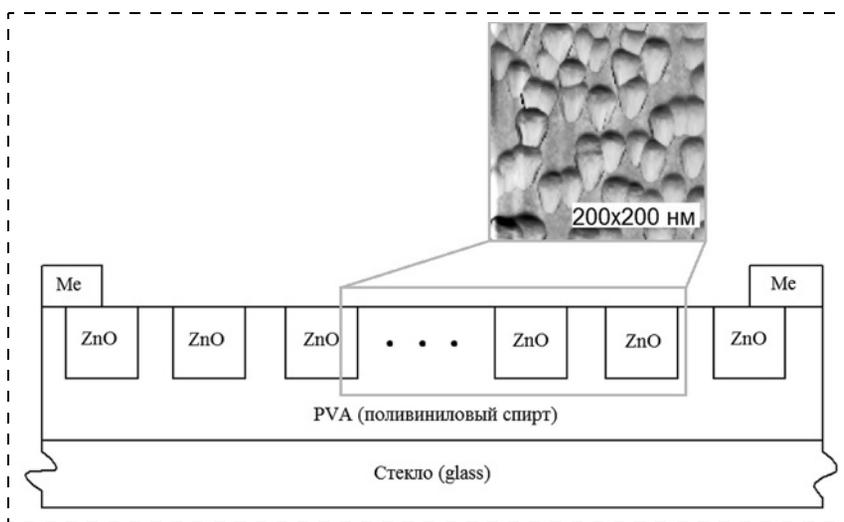


Рис. 1. Чувствительный элемент газового сенсора на основе наноккомпозита из ультрадисперсного порошка ZnO и ПВС (Me — проводящие металлические контактные площадки)

$$\Delta U = \frac{qb_{ZnO}}{\epsilon\epsilon_0 a_{ZnO} d_{ZnO}}$$

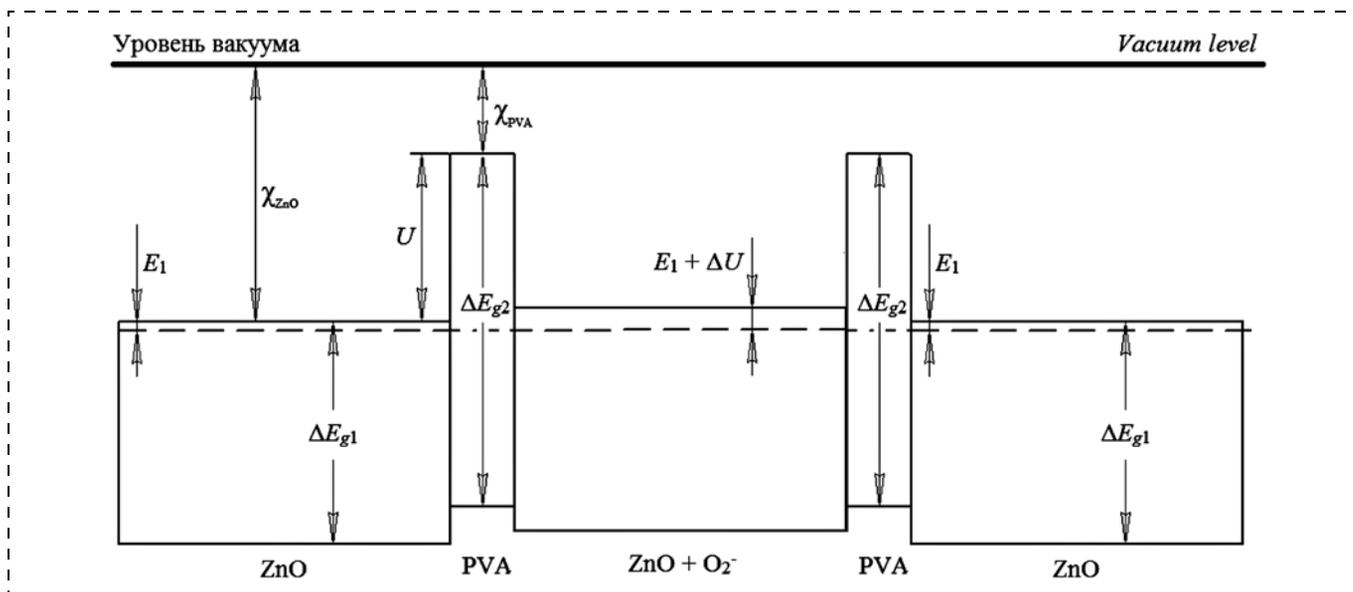


Рис. 2. Зонная диаграмма структуры ZnO/ПВС

Так, адсорбция одной молекулы кислорода, связывающего один свободный электрон, приводит к сдвигу уровня Ферми относительно дна зоны проводимости на значение $\Delta U = 0,106$ эВ. Данное смещение возможно только в наночастицах оксида цинка, в которых есть хотя бы один свободный электрон. С учетом работы [15] и среднего размера наночастицы ее объем составляет $V = 10 \times 30 \times 30 \text{ нм} = 9000 \text{ нм}^3$, а следовательно, среднее число свободных электронов в одном кристаллите $n_{sr} = N_D V \approx 0,3$. Это означает, что при близкой к комнатной температуре только на трех из десяти наночастицах возможна хемосорбция кислорода, приводящая к сдвигу уровня Ферми.

Исследование разницы между энергиями заполненных и незаполненных электронных орбиталей молекулы поливинилового спирта [13, 22] показало, что его эффективная ширина запрещенной зоны (ширина щели НОМО-LUMO) равна $\Delta E_{g2} = 5,32$ эВ. При этом значение величины, эквивалентной энергии сродства электронов, для ПВС равно $\chi_{PVA} = 1,5$ эВ [20].

На основе сведений об электрофизических свойствах компонентов нанокompозита можно построить его зонную диаграмму, которая приведена на рис. 2. Поскольку электроны являются основными носителями заряда в наночастицах ZnO, то для расчета тока через чувствительный элемент газового сенсора можно рассчитать только его электронную составляющую. На основе гипотезы о том, что металлические контактные площадки обеспечивают омический

контакт, можно предположить, что электроны проводимости, проходя через слои ПВС, преодолевают потенциальный барьер высотой $U = \chi_{ZnO} - \chi_{PVA} = 2,69$ эВ. Для наночастиц с хемосорбированными молекулами кислорода характерно изменение потенциальной энергии на величину ΔU .

Поскольку толщины слоев ПВС достаточно малы, то через них возможно туннелирование носителей заряда. Поэтому, несмотря на то, что поливиниловый спирт является диэлектриком, через нанокompозит будет протекать туннельный ток. Для того чтобы его оценить, рассмотрим чувствительный элемент газового сенсора как одномерную многобарьерную структуру конечной длины, состоящую из квантовых ям, в роли которых выступают наночастицы ZnO, и потенциальных барьеров, которыми являются слои ПВС. Поскольку кристаллиты оксида цинка имеют форму, близкую к прямоугольному параллелепипеду, при моделировании можно воспользоваться моделью одномерных прямоугольных потенциальных ям конечной высоты.

Принцип расчета тока через чувствительный элемент газового сенсора на основе нанокompозита из ультрадисперсного порошка и связующего. В общем случае для рассматриваемого нанокompозита при температуре T , отличной от 0 К, плотность тока имеет как непосредственно туннельную составляющую, так и тепловую. Расчет плотности туннельного тока будем проводить в рамках модели последовательного туннелирования, для этого предварительно рассчитаем ко-

эффицент прохождения электронов с разной энергией через одномерную многобарьерную структуру. Использование одномерного приближения является оправданным, поскольку толщина формируемого на подложке нанокompозита сопоставима с размером одиночной наночастицы, и только малое число наночастиц находится на расстоянии туннельной прозрачности барьера (см. вставку к рис. 1).

Пусть электрон с энергией E перемещается через область с потенциальной энергией U . Тогда в этой области волновая функция электрона подчиняется одномерному стационарному уравнению Шредингера:

$$\frac{d^2 \psi}{dx^2} + \frac{2m_e^*}{\hbar^2} (E - U) \psi = 0,$$

где \hbar — приведенная постоянная Планка.

Далее предполагается, что для анализируемого чувствительного элемента газового сенсора точка отсчета энергии отвечает дну зоны проводимости, а максимальное значение энергии частицы определяется разностью работ выхода из металла контактных площадок и наночастицы ZnO, а следовательно, не превышает U .

Для наночастицы ZnO (области квантовой ямы со стенками конечной высоты) решением уравнения Шредингера является волновая функция

$$\psi_j(x) = A_j \exp(ik_j x) + B_j \exp(-ik_j x),$$

где $k_j = \sqrt{\frac{2m_e^*(E - U_j)}{\hbar}}$; i — мнимая единица; $j = 1, 2, \dots, n$ — число наночастиц в многобарьерной структуре. Потенциальная энергия $U_j = 0$ для наночастиц без хемосорбированной молекулы кислорода. У частиц оксида цинка с адсорбированной молекулой кислорода потенциальная энергия $U_j = \Delta U$.

Для слоя ПВС (области потенциального барьера) решением уравнения Шредингера является волновая функция

$$\psi_l(x) = C_l \exp(\beta_l x) + G_l \exp(-\beta_l x),$$

где $\beta_l = \sqrt{\frac{2m_e^*(U_l - E)}{\hbar}}$; $l = 1, 2, \dots, m$ — число слоев ПВС в многобарьерной структуре.

Уравнение Шредингера решается отдельно для каждой области. Поскольку волновая функция по своим свойствам не должна иметь раз-

рывов и перегибов, то при составлении общей волновой функции движения частицы во всех областях используют условия склейки функций $\psi_j(x)$ и $\psi_l(x)$ при $x = x_{jl}$ ($j = l$ и $j = l + 1$), т. е. на границах j -я наночастица ZnO — l -й слой ПВС:

$$\psi_j(x = x_{jl}) = \psi_l(x = x_{jl}),$$

$$\left. \frac{d\psi_j}{dx} \right|_{x=x_{jl}} = \left. \frac{d\psi_l}{dx} \right|_{x=x_{jl}}.$$

Данные уравнения записываются для всех границ между областями структуры. Полученные равенства образуют систему линейных уравнений, из которой определяется коэффициент A_n , характеризующий прошедший через n наночастиц и l барьеров электрон, и коэффициент A_1 , который характеризует волновую функцию падающего на многобарьерную структуру электрона.

Количественной характеристикой движения электрона является коэффициент пропускания D , который определяется как

$$D = \lim_{x \rightarrow \infty} \left(\frac{j_n^{(+)}}{j_1^{(+)}} \right) = \frac{k_n |A_n|^2}{k_1 |A_1|^2},$$

где $j_n^{(+)}$ — плотность потока вероятности частиц, прошедших через n наночастиц и l барьеров; $j_1^{(+)}$ — плотность потока вероятности частиц, падающих на многобарьерную структуру.

Исходя из значения коэффициента пропускания, туннельный ток можно определить как ток, создаваемый электронами при приложении напряжения V к чувствительному элементу газового сенсора:

$$J_e = \frac{qm_e^* k_b T}{2\pi^2 \hbar^3} \int_0^\infty D(E_x) \ln \left[1 + \exp\left(\frac{E_{Fe} - E_x}{k_b T}\right) \right] dE_x - \frac{qm_e^* k_b T}{2\pi^2 \hbar^3} \int_0^\infty D(E_x) \ln \left[1 + \exp\left(\frac{E_{Fe} - E_x - qV}{k_b T}\right) \right] dE_x,$$

где k_b — постоянная Больцмана; q — заряд электрона; E_{Fe} — энергия Ферми эмиттера, соответствующая используемым омическим контактам.

При этом полная плотность туннельного тока определяется как

$$J_t = \begin{cases} \left[1 - \exp\left(-\frac{qV}{k_b T}\right) \right]^{-1} |J_e|, & \text{при } V \neq 0; \\ 0, & \text{при } V = 0. \end{cases}$$

С учетом изложенного выше промоделируем коэффициент пропускания при наличии и отсутствии кислорода, адсорбированного на наночастицах. Для моделирования составлена специальная программа на языке C++, которая рассчитывает коэффициенты системы уравнений, составленных из условий сшивки, решает полученную систему методом *LU*-факторизации и определяет коэффициенты пропускания для всех значений энергии электронов в диапазоне от 0 до *U*. При этом учитывается случайное изменение положения уровня Ферми в наночастицах оксида цинка на основе предположения о нормальном распределении числа хемосорбированных молекул кислорода.

При ненулевых температурах плотность тока имеет также тепловую составляющую, которая определяется как:

$$J_{term} = n_{sr}q \left(\frac{k_b T}{2m_e^*} \right)^{1/2} \exp\left(-\frac{qU}{k_b T}\right) \left[\exp\left(\frac{qV}{k_b T}\right) - 1 \right].$$

В итоге полная плотность тока, текущего через чувствительный элемент газового сенсора на основе нанокompозита из ультрадисперсного порошка металлоксида и связующего, выражается суммой:

$$J = J_t + J_{term}.$$

Однако с учетом высокого потенциального барьера на пути движения электронов и их низкой концентрации численные оценки показывают, что тепловая составляющая значительно (на несколько порядков) меньше туннельной.

2. Результаты моделирования и их обсуждение

На рис. 3 представлены графики зависимостей коэффициента пропускания от энергии электронов для чувствительного элемента газового сенсора на основе нанокompозита, состоящего из 10 частиц оксида цинка и 9 потенциальных барьеров, при наличии кислорода в окружающей атмосфере и при его отсутствии. При моделировании учитывался возможный разброс толщины слоя поливинилового спирта ($d_{PVA} = 2 \pm 0,3$ нм) и размера наночастиц ZnO ($d_{ZnO} = 10 \pm 2$ нм).

Анализ представленной зависимости показывает, что хемосорбция кислорода на кристаллитах приводит к сдвигу резонансных пиков пропускания, что является следствием сдвига

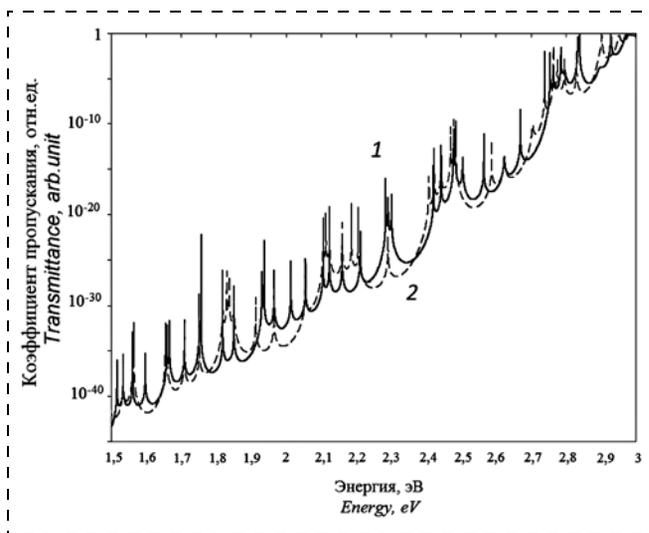


Рис. 3. Зависимость коэффициента пропускания структуры от энергии электрона при различных условиях:

1 — при наличии адсорбированного кислорода; 2 — при отсутствии адсорбированного кислорода

уровня Ферми и соответствующей ему вариации высоты потенциальных барьеров и глубины квантовых ям.

На основе зависимости коэффициента пропускания от энергии электронов были рассчитаны вольт-амперные характеристики чувствительного элемента газового сенсора на основе нанокompозита ультрадисперсный порошок ZnO — ПВС с учетом хемосорбции молекул кислорода в форме O_2^- . Предполагалось, что основное падение напряжения происходит на слоях ПВС, и вследствие его малости ($V \leq U$), а также широкой щели НОМО-LUMO, для коэффициента прохождения характерна слабая зависимость от приложенного напряжения. Рассчитанные ВАХ представлены на рис. 4, при их построении усредняли значения плотностей тока при различных возможных местах адсорбции кислорода.

Анализ вольт-амперных характеристик показывает, что с ростом приложенного напряжения к чувствительному элементу газового сенсора происходит увеличение плотности тока, преимущественно за счет туннельной составляющей. Пологий участок на представленных зависимостях может быть объяснен как высоким потенциальным барьером на пути движения электронов, так и малостью энергии Ферми эмиттера. В свою очередь сильная модуляция проводимости многобарьерной структуры при хемосорбции кислорода, видимо, является следствием сдвига уровня Ферми в наночастице металлоксида.

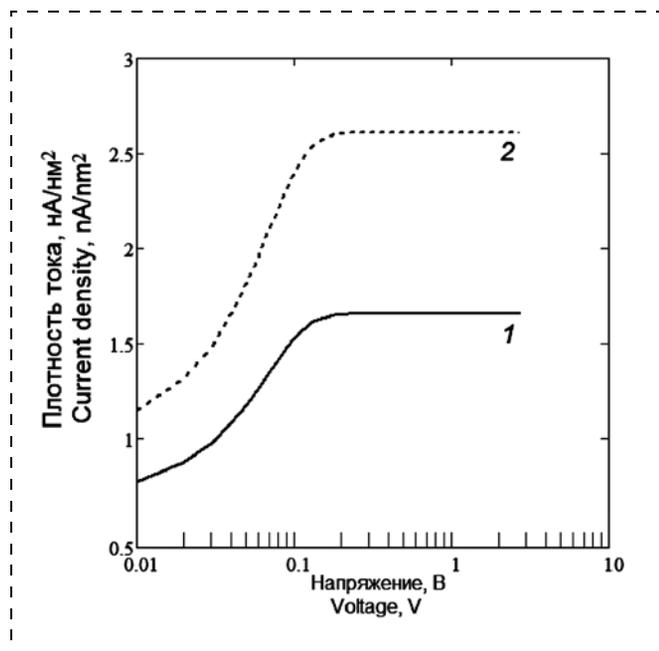


Рис. 4. Вольт-амперные характеристики чувствительного элемента газового сенсора при различных условиях:

1 — при наличии адсорбированного кислорода; 2 — при отсутствии адсорбированного кислорода

С учетом изложенного выше, для моделируемого чувствительного элемента газового сенсора ожидается увеличение проводимости при наличии в окружающей атмосфере газов-восстановителей, так как их взаимодействие с молекулами кислорода приведет к возвращению электронов проводимости в наночастицы.

Заключение

Таким образом, в настоящей работе оценены перспективы использования квантово-размерных эффектов при создании газовых сенсоров нового поколения с чувствительными элементами на основе нанокompозита из ультрадисперсного порошка металлоксида и связующего. Установлены зависимости коэффициента пропускания электронов от их энергии и вольт-амперные характеристики при наличии и отсутствии хемосорбированных на наночастицах ZnO молекул кислорода, демонстрирующие существенную роль квантово-размерных эффектов в модуляции проводимости чувствительного элемента. На основе результатов численного моделирования показано, что с ростом концентрации атомов кислорода наблюдается смещение пиков на зависимости коэффициента пропускания от энергии электрона и уменьшение плотности туннельного тока.

Ожидаемое развитие дальнейших исследований связано как с уточнением предложенной модели, ее расширением на более общий случай трехмерного расположения наночастиц в нанокompозите, так и с экспериментальной разработкой чувствительных элементов и измерением их сенсорного отклика к газам-аналитам.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта 19-08-00924 и гранта Президента МК-3541.2021.1.2.

Список литературы

1. Korotcenkov G. Chemical Sensors: Comprehensive Sensor Technologies. Vol. 4. Solid Stat Sensors. New York: Momentum Press. 528 p.
2. Pronin I., Yakushova N., Averin I., Karmanov A., Moshnikov V., Dimitrov D. Investigation of Gas-sensitive Properties of Thin-Film Thermovoltaic Sensor Elements Based on Zinc Oxide // Coatings. 2019. Vol. 9. P. 693–701.
3. Chao J., Chen Y., Xing S., Zhang D., Shen W. Facile fabrication of ZnO/C nanoporous fibers and ZnO hollow spheres for high performance gas sensor // Sensors and Actuators B: Chemical. 2019. Vol. 298. P. 126927.
4. Dimitrov D. T., Nikolaev N. K., Papazova K. I., Krasteva L. K., Bojinova A. S., Peshkova T. V., Kaneva N. V., Pronin I. A., Averin I. A., Yakushova N. D., Karmanov A. A., Georgieva A. T., Moshnikov V. A. Investigation of the electrical and ethanol-vapour sensing properties of the junctions based on ZnO nanostructured thin film doped with copper // Applied Surface Science. 2017. Vol. 392. P. 95–108.
5. Pan Z., Sun F., Zhu X., Chen Z., Lin X., Zheng Y., Zhong W., Zhuang Z., Gu F. Electrodeposition-based of a ZnO-ordered macroporous film gas sensor with enhanced sensitivity // Journal of Materials Chemistry A. 2019. Vol. 7, N. 3. P. 1287–1299.
6. Wang P., Dong T., Jia C., Yang P. Ultrasensitive acetone-gas sensor based ZnO flowers functionalized by Au nanoparticle loading on certain facet. // Sensors and Actuators B: Chemical. 2019. V. 288. P. 1–11.
7. Pronin I. A., Yakushova N. D., Averin I. A., Karmanov A. A., Moshnikov V. A. A model of the vacuum level effect on the sensor response of vacuum sensors based on nanostructured semiconductor oxide materials // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2018. Vol. 387, N 1.
8. Кривецкий В. В., Румянцева М. Н., Гаськов А. М. Химическая модификация нанокристаллического диоксида олова для селективных газовых сенсоров // Успехи химии. 2013. Т. 82, № 10. С. 917–941.
9. Gurlo A., Barsan N., Oprea A., Sahn T., Weimar U. An n- to p- type conductivity transition induced by oxygen adsorption on α -Fe₂O₃. // Applied Physics Letters. 2004. V. 85. P. 2280–2282.
10. Крупкин Е. И., Аверин И. А., Пронин И. А., Карманов А. А., Якушова Н. Д. Получение наноструктурированных пленок оксида цинка и исследование их фотокаталитических свойств // Нано- и микросистемная техника. 2019. Т. 21, № 1. С. 23–34.
11. Wanotayan T., Panpranot J., Qin J., Boonyongmaneerat Y. Microstructures and photocatalytic properties of ZnO

films fabricated by Zn electrodeposition and heat treatment // Materials Science in Semiconductor Processing. 2018. Vol. 74. P. 232–237.

12. **Парент РФ** № 2718710, G01N 27/12, B82Y 40/00. Способ изготовления газового сенсора на основе механо-активированного порошка оксида цинка и газовый сенсор на его основе // Бюл. № 11 от 14.04.2020.

13. **Pham N. K., Vu N. H., Pham V. V., Ta H. K. T., Cao T. M., Thoai N., Tran V. C.** Comprehensive resistive switching behavior of hybrid polyvinyl alcohol and TiO₂ nanotube nanocomposites from combining experimental and density functional theory studies // Journal of Materials Chemistry C. 2020. Vol. 6, N. 8. P. 1971–1979.

14. **Chandrakala H. N., Ramaraj B., Shivakumaraiah, Lee J. H., Siddaramaiah.** Polyvinyl alcohol/carbon coated zinc oxide nanocomposites: Electrical, optical, structural and morphological characteristics // Journal of Alloys and Compounds. 2013. V. 580. P. 392–400.

15. **Muthupandeeswari A., Kalyani P., Nehru L. C.** On the effects of high loading of ZnO nanofiller on the structural, optical, impedance and dielectric features of PVA/ZnO nanocomposite films // Polymer Bulletin. 2020. Vol. 1. P. 1–18.

16. **Rashmi S. H., Raizada A., Madhu G. M., Kittur A. A., Suresh R., Sudhina H. K.** Influence of zinc oxide nanoparticles on structural and electrical properties of polyvinyl al-

cohol films // Plastics, Rubber and Composites. 2014. Vol. 44, N. 1. P. 33–39.

17. **Abebe B., Murthy H. C. A., Zereffa E. A., Adimasu Y.** Synthesis and characterization of ZnO/PVA nanocomposites for antibacterial and electrochemical applications. // Inorganic and Nano-Metal Chemistry. 2020. Vol. 1. P. 1–12.

18. **Воробьева Н. А.** Нанокристаллический ZnO(M) (M = Ga, In) для газовых сенсоров и прозрачных электродов // М.: Изд-во МГУ, 2015. 180 с.

19. **Han J., Mantas P. Q., Senos A. M. R.** Defect chemistry and electrical characteristics of undoped and Mn-doped ZnO // Journal Europe Ceramic Society. 2002. Vol. 22. P. 49–59.

20. **Hmar J. J. L.** Flexible resistive switching bistable memory devices using ZnO nanoparticles embedded in polyvinyl alcohol (PVA) matrix and poly(3,4-ethylenedioxythiophene) polystyrene sulfonate (PEDOT:PSS) // RSC Advances. 2018. Vol. 8, N. 36. P. 20423–20433.

21. **Ellmer K.** Transparent Conductive Zinc Oxide and Its Derivatives, in: Handbook of transparent conductors, edited by D. S. Ginley, H. Hosono, D. C. Paine, New York: Springer, 2010. P. 193–263.

22. **Ganeshan S. K., Selamneni V., Sahatiya P.** Water Dissolvable MoS₂ Quantum Dots/ PVA film as an Active Material for Destructible Memristor // New Journal of Chemistry. 2020. Vol. 44. P. 11941–11948.

E. I. Krupkin, Student, egor.krupkin99@mail.ru,

I. A. Averin, Dr. Sci., Professor, Head of Department, nano-micro@mail.ru,

I. A. Pronin, Dr. Sci., Professor, pronin_i90@mail.ru,

S. E. Igoshina, Ph. D., Associate Professor, sigoshina@mail.ru,

A. A. Karmanov, Ph. D., Associate Professor, starosta07km1@mail.ru,

Penza State University, Penza, 440026, Russian Federation

Corresponding author:

Krupkin Egor I., Student, Penza State University, Penza, 440026, Russian Federation, egor.krupkin99@mail.ru

Quantum-Dimensional Effects in Zinc Oxide Nanocomposites as Basis for Design of New Generation Gas Sensors

Received on February 17, 2021

Accepted on March 02, 2021

The possibility of using a nanocomposite based on zinc oxide ultrafine powder and polyvinyl alcohol as a sensitive element of a gas sensor is analyzed. It is shown that zinc oxide nanoparticles with a shape close to a rectangular parallelepiped can be considered as potential wells, separated by layers of polyvinyl alcohol that form potential barriers.

The contribution of the tunneling component to nanocomposite current density is estimated for systems with and without oxygen chemisorptions. Results of numerical simulation are shown that a shift of the peaks in the dependence of transmittance on electron energy and a decrease of the tunneling current density are going with an increase in the concentration of oxygen atoms. Perspectives of the use of quantum-dimensional effects in the development of new generation gas sensors, which are based on conductivity modulation during sensor interaction with analyte gases, are demonstrated

Keywords: zinc oxide, polyvinyl alcohol, gas sensor, gas sensibility, quantum-dimensional effects, electron tunneling, transmittance

For citation:

Krupkin E. I., Averin I. A., Pronin I. A., Igoshina S. E., Karmanov A. A. Quantum-Dimensional Effects in Zinc Oxide Nanocomposites as Basis for Design of New Generation Gas Sensors, *Nano- i mikrosistemnaya tekhnika*, 2021, vol. 23, no. 3, pp. 122–130.

DOI: 10.17587/nmst.23.122-130

References

1. **Korotcenkov G.** Chemical Sensors: Comprehensive Sensor Technologies. Vol. 4. Solid Stat Sensors. — New York, Momentum Press, 528 p.
2. **Pronin I., Yakushova N., Averin I., Karmanov A., Moshnikov V., Dimitrov D.** Investigation of Gas-sensitive Properties of Thin-Film Thermovoltaic Sensor Elements Based on Zinc Oxide, *Coatings*, 2019, vol. 9, pp. 693–701.
3. **Chao J., Chen Y., Xing S., Zhang D., Shen W.** Facile fabrication of ZnO/C nanoporous fibers and ZnO hollow spheres for high performance gas sensor, *Sensors and Actuators B: Chemical*, 2019, vol. 298. P. 126927.
4. **Dimitrov D. T., Nikolaev N. K., Papazova K. I., Krasteva L. K., Bojinova A. S., Peshkova T. V., Kaneva N. V., Pronin I. A., Averin I. A., Yakushova N. D., Karmanov A. A., Georgieva A. T., Moshnikov V. A.** Investigation of the electrical and ethanol-vapour sensing properties of the junctions based on ZnO nanostructured thin film doped with copper, *Applied Surface Science*, 2017, vol. 392, pp. 95–108.
5. **Pan Z., Sun F., Zhu X., Chen Z. Lin X., Zheng Y., Zhong W., Zhuang Z., Gu F.** Electrodeposition-based of a ZnO-ordered macroporous film gas sensor with enhanced sensitivity, *Journal of Materials Chemistry A*, 2019, vol. 7, no. 3, pp. 1287–1299.
6. **Wang P., Dong T., Jia C., Yang P.** Ultrasensitive acetone-gas sensor based ZnO flowers functionalized by Au nanoparticle loading on certain facet, *Sensors and Actuators B: Chemical*, 2019, vol. 288, pp. 1–11.
7. **Pronin I. A., Yakushova N. D., Averin I. A., Karmanov A. A., Moshnikov V. A.** A model of the vacuum level effect on the sensor response of vacuum sensors based on nanostructured semiconductor oxide materials, *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2018, vol. 387, no. 1.
8. **Kriveckij V. V., Rumjanceva M. N., Gas'kov A. M.** Himicheskaja modifikacija nanokristallicheskogo dioksida olova dlja selektivnyh gazovyh sensorov, *Uspehi himii*, 2013, vol. 82, no. 10, pp. 917–941 (in Russian).
9. **Gurlo A., Barsan N., Oprea A., Sahn T., Weimar U.** An n- to p- type conductivity transition induced by oxygen adsorption on α -Fe₂O₃, *Applied Physics Letters*, 2004, vol. 85, pp. 2280–2282.
10. **Krupkin E. I., Averin I. A., Pronin I. A., Karmanov A. A., Yakushova N. D.** Poluchenie nanostrukturirovannykh plenok oksida tsinka i issledovanie ikh fotokataliticheskikh svoystv, *Nano- i mikrosistemnaya tekhnika*, 2019, vol. 21, no. 1, pp. 23–34 (in Russian).
11. **Wanotayan T., Panpranot J., Qin J., Boonyongmaeerat Y.** Microstructures and photocatalytic properties of ZnO films fabricated by Zn electrodeposition and heat treatment, *Materials Science in Semiconductor Processing*, 2018, vol. 74, pp. 232–237.
12. **Patent** of the Russian Federation N. 2718710, G01N 27/12, B82Y 40/00. Sposob igotovleniya gazovogo sensora na osnove mehanoaktivirovannogo poroshka oksida cinka i gazovyy sensor na ego osnove, Bull. N. 11 from 14.04.2020 (in Russian).
13. **Pham N. K., Vu N. H., Pham V. V., Ta H. K. T., Cao T. M., Thoi N., Tran V. C.** Comprehensive resistive switching behavior of hybrid polyvinyl alcohol and TiO₂ nanotube nanocomposites from combining experimental and density functional theory studies, *Journal of Materials Chemistry C*, 2020, vol. 6, no. 8, pp. 1971–1979.
14. **Chandrakala H. N., Ramaraj B., Shivakumaraiah, Lee J. H., Siddaramaiah.** Polyvinyl alcohol/carbon coated zinc oxide nanocomposites: Electrical, optical, structural and morphological characteristics, *Journal of Alloys and Compounds*, 2013, vol. 580, pp. 392–400.
15. **Muthupandeeswari A., Kalyani P., Nehru L. C.** On the effects of high loading of ZnO nanofiller on the structural, optical, impedance and dielectric features of PVA/ZnO nanocomposite films, *Polymer Bulletin*, 2020, vol. 1, pp. 1–18.
16. **Rashmi S. H., Raizada A., Madhu G. M., Kittur A. A., Suresh R., Sudhina H. K.** Influence of zinc oxide nanoparticles on structural and electrical properties of polyvinyl alcohol films, *Plastics, Rubber and Composites*, 2014, vol. 44, no. 1, pp. 33–39.
17. **Abebe B., Murthy H. C. A., Zereffa E. A., Adimasu Y.** Synthesis and characterization of ZnO/PVA nanocomposites for antibacterial and electrochemical applications, *Inorganic and Nano-Metal Chemistry*, 2020, vol. 1, pp. 1–12.
18. **Vorob'eva N. A.** Nanokristallicheskiy ZnO(M) (M = Ga, In) dlja gazovyh sensorov i prozrachnyh jelektrodov, Moscow, MSU, 2015, 180 p. (in Russian)
19. **Han J., Mantas P. Q., Senos A. M. R.** Defect chemistry and electrical characteristics of undoped and Mn-doped ZnO, *Journal Europe Ceramic Sociaty*, 2002, vol. 22, pp. 49–59.
20. **Hmar J. J. L.** Flexible resistive switching bistable memory devices using ZnO nanoparticles embedded in polyvinyl alcohol (PVA) matrix and poly(3,4-ethylenedioxythiophene) polystyrene sulfonate (PEDOT:PSS), *RSC Advances*, vol. 8, no. 36, pp. 20423–20433.
21. **Ellmer K.** Transparent Conductive Zinc Oxide and Its Derivatives, in: Handbook of transparent conductors, edited by D. S. Ginley, H. Hosono, D. C. Paine, New York, Springer, 2010, pp. 193–263.
22. **Ganeshan S. K., Selamneni V., Sahatiya P.** Water Dissolvable MoS₂ Quantum Dots/ PVA film as an Active Material for Destructible Memristor, *New Journal of Chemistry*, 2020, vol. 44, pp. 11941–11948.

Ю. В. Ларионов, ст. науч. сотр., luv@kapella.gpi.ru,
Институт общей физики им. А. М. Прохорова РАН, Москва

ГЕОМЕТРИЯ СТРУКТУР НА ОСНОВЕ АНИЗОТРОПНОГО ТРАВЛЕНИЯ В НАНОДИАПАЗОНЕ

Поступила в редакцию 01.04.2021

Обсуждены геометрические несовершенства поверхности наноструктур, сформированных анизотропным травлением кремния. Они увеличивают неопределенность размеров наноструктур и затрудняют использование их в качестве эталонов для линейных измерений. Выявлены причины, приводящие к несовершенствам поверхности таких наноструктур. Обсуждены способы уменьшения их влияния на значения размеров.

Ключевые слова: анизотропное травление, нанометрология, МШПС-2К, SCCDRM, IVPS-100-PTB, РЭМ, ПЭМ, АСМ

Введение

Анизотропное травление (АТ) кристаллического кремния потенциально позволяет создать топологические структуры, имеющие плоские грани, которые пересекаются по прямой линии. Поэтому профиль таких АТ-структур (структур, созданных с помощью АТ) представляет собой геометрически правильные прямоугольник или трапецию. Линейные размеры участков профиля АТ-структур или расстояния между их гранями могут быть измерены с неопределенностью менее нанометра, что соответствует требованиям к современным эталонам длины в нанометрологии. Но оказалось, что реальный профиль АТ-структур, зафиксированный с помощью просвечивающего электронного микроскопа (ПЭМ), отличен от идеального.

В работе [1] представлено ПЭМ-изображение участка профиля АТ-структуры с вертикальными стенками вблизи границы ее верхнего основания (ВО), на котором видно характерное закругление в том месте, где в идеале должен существовать угол, формируемый линиями сечения ВО и боковой стенки (БС). Радиус окружности, аппроксимирующей закругление, ~8 нм. Закругления на углах АТ-структур обнаружены и в других исследованиях. У верхнего угла выступа меры МШПС-2К, созданной с помощью АТ, радиус закругления составил 2...4 нм [2]. Закругления затрудняют выбор точного положения границ участков АТ-структур, что приводит к дефинициальной неопределенности [3] в значениях

их размера. Могут существовать и другие отклонения реального профиля АТ-структуры от совершенного.

Работа посвящена исследованию несовершенств реального профиля АТ-структур и их влиянию на неопределенности значений размеров этих структур.

Дефекты формы профиля ВО

Образование закруглений на углах АТ-структур объяснено характером анизотропного травления плоских участков поверхности кремния вблизи границ с другими плоскими участками с иной ориентацией [4]. Атомы кремния на гребне, образованном пересекающимися плоскостями, слабее связаны с соседними атомами и легче отделяются от подложки при воздействии травителя. Отделению атомов от подложки способствуют дислокации в кремнии вблизи гребня. Это формирует закругления, а также вызывает подтрав поверхности кремния под маской [4]. Подтрав зависит от близости других участков поверхности вблизи гребня, в частности, от угла между сходящимися поверхностями, формирующими гребень [4].

Закругление на углу профиля формируется последовательностью ступенек (террасой), поверхности которых параллельны исходной поверхности и ограничены БС с резким изменением высоты. С отхождением ступенек от исходной поверхности уменьшается их ширина и увеличивается высота. В результате ступеньки, отходя от

ВО и БС, сходятся к общей точке. Шаг в расположении ступенек, отходящих от ВО и БС, разный, поэтому закругление на профиле структуры не может быть строго участком окружности.

В наибольшей степени устойчива к травлению, а поэтому и наиболее совершенна поверхность, параллельная кристаллографической плоскости [111]. Она и формирует БС. До АТ на ней обнаруживается нанорельеф в виде мелких ямок травления [5]. С отхождением от этой поверхности к плоскости [100], которая формирует ВО, возникают ступеньки с уменьшающимися размерами и увеличивающимися БС, сформированными участками плоскостей [121] и [211]. Затем профиль переходит к серии ступенек, но уже параллельных ВО. Далее ступеньки заменяются выступами в виде нанопирамид. Источником дефектов поверхности в виде последовательности ступенек может быть не только близость угла, но и приповерхностные дефекты в кремнии или внешние дефекты на ней [4].

Таким образом, закругление на углу профиля АТ-структур не является результатом нарушения технологии травления, а определяется вариацией условий анизотропного травления кремния вблизи неоднородностей поверхности: на гребне сходящихся поверхностей, у границы маски на поверхности, над дефектами структуры кремния. В работе выявилось, что вариация этих условий еще разнообразнее, чем представлялось ранее.

В работе [6] представлены ПЭМ-изображения профилей ВО двух номинально одинаковых АТ-структур, сформированных на разных кремниевых пластинах, но в одном АТ-процессе. На одном из них профиль имеет форму "фески", где линия ВО приподнята над верхними границами линии БС на ~2...3 нм в виде пьедестала. Границы ВО и верхние границы пьедестала соединяются участками кривых в виде закруглений. Другая АТ-структура имеет профиль ВО в виде "фаски" с переходом от БС к ВО также в форме закруглений. Радиус закруглений для выступа с фаской и феской разный и почти всегда отличен у правой и левой границ ВО. Асимметрия профиля у ВО может быть вызвана отклонением поверхности пластины от плоскости [100], с которой она номинально должна совпадать. Отклонение плоскости создают сознательно при резке кремниевых пластин.

Дефинициальную неопределенность ширины ВО вследствие закруглений можно уменьшить, если измерять размеры по модельному, вспомо-

гательному профилю. Модельная трапеция формируется прямыми, аппроксимирующими линии БС и ВО выступа на ПЭМ-изображении, до их пересечения. Параметры модельной трапеции будут соответствовать параметрам реальной структуры без закруглений на ее углах. Степень близости модельного профиля к реальному и возникшая неопределенность измерения ширины ВО были оценены в работе [6]. В ней по ПЭМ-изображению измеряли отклонение положения угловой точки модельной трапеции от ближайшей границы ВО, обозначенной крайним атомом верхнего кремниевого слоя ВО. Модельная трапеция формировалась по внешней поверхности выступа, покрытого оксидом. Это расстояние можно откалибровать по числу периодов между атомами кремния, период известен с субнанометровой неопределенностью. Отклонение угловой точки модельной трапеции от границы ВО для выступа МШПС-2К достигло 3...4 нм [6]. Если ВО на ПЭМ-изображении уместается целиком, то таким же способом калибруется ширина ВО выступа. Дефинициальная неопределенность ширины ВО модельной трапеции в работе [6] оказалась менее 1 нм.

Такая неопределенность получается лишь в случае, если слой естественного оксида формирует идеально плоские и ровные участки поверхности выступа, а закругления являются единственным отклонением от формы идеальной трапеции. На рис. 1 показан ПЭМ-профиль одного из выступов (рис. 1, а), а также его РЭМ-изображение (рис. 1, б). На рис. 1, а виден профиль с феской и с неровной линией ВО (прямая показывает ожидаемую прямую ВО). Отклонение линии от прямой означает подтрав ВО (помечен стрелками) под края маски, что увеличивает неопределенность положения границ ВО. Феска вносит дополнительную неопределенность в положение угловых точек модельной трапеции. Для нее прямые БС отсекают от линии ВО крайние участки и поэтому модельная ширина ВО будет зависеть от высоты фески.

Изображение ВО на рис. 1, б ограничено белыми линиями разной интенсивности. В его центре виден локальный дефект, включающий в себя левую границу ВО. Он локально уменьшил интенсивность левой линии. На рис. 1, б виден и другой дефект, искривляющий прямую, которая соответствует нижнему краю левой БС (отмечена пунктиром). Это результат отхода поверхности БС от плоскости [111]. Расположение двух

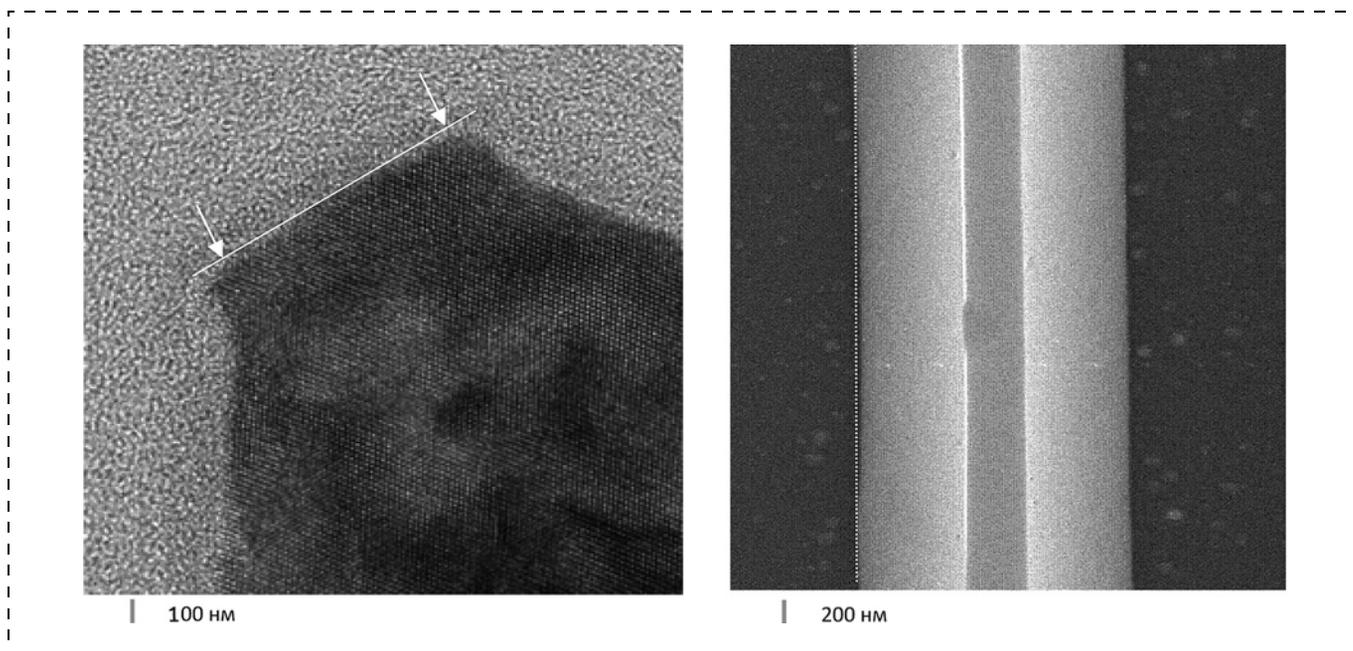


Рис. 1. ПЭМ-профиль выступа вблизи его ВО (а) и его РЭМ-изображение (б). Прямая обозначает след идеального ВО, его подтрав указан стрелками (а). Асимметрия профиля ВО отображена в виде белых полос разной интенсивности на (б). Интенсивность левой полосы меняется в разных сечениях выступа. В центре (б) у левого края ВО виден локальный дефект, а у нижней границы левой БС — протяженный дефект в виде отклонения границы БС от прямой (показана пунктиром)

разных дефектов на одном локальном участке по-видимому не является случайным.

Белые полосы у границ ВО на рис. 1, б отображают закругления на углах выступов. Более пологие участки фески на правой границе ВО рождают пики меньшей интенсивности на правом краю изображения (рис. 1, б). Ширина левых пиков меняется в разных сечениях выступа. Это может свидетельствовать о вариации высоты фески у левого края ВО.

Дефекты формы профиля БС

Наиважнейшим качеством идеальной АТ-структуры является профиль всех ее участков в виде прямых линий. Выяснилось, что представление о совершенстве профиля даже для поверхности [111] является идеализацией. В работе [4] проведено сканирование участков поверхности кремния [111] после АТ с помощью чувствительного профилометра. Выявилось, что вдоль линии сканирования существует квазипериодический набор пиков и долин с перепадом высоты до 17 нм при среднем значении периода около 1 мкм. Вдоль склона типичного пика протяженностью ~500 нм (среднее значение ширины БС для МШПС-2К) перепад высоты рельефа может

составить ~10 нм. Это приведет к отклонению реальной поверхности БС от номинальной плоскости [111] на ~2°.

Обнаруженный профиль сечения отображает рельеф поверхности [111] после ее АТ. В результате исходная поверхность покрылась набором лунок (ямок) с квазипериодическим распределением их по площади. Нанорельеф внутри лунки представляет собой набор ступенек, параллельных исходной плоскости [111], опускающихся к ее центру, а затем поднимающихся по другой ее стороне [4]. Лунки возникают предположительно вследствие дефектов упаковки под поверхностью кремния. Появление дефектов упаковки связывают с изменением состояния атомов кислорода, исходно растворенного в кремнии. В результате термообработки кремния атомы кислорода связываются с кремниевой решеткой, вызывая появление напряжений, приводящих к появлению этих дефектов.

Отклонение формы профиля участков поверхности [111] от прямой линии подтверждено в работе [7]. Там для выступа с наклонными БС меры МШПС-2К представлен ВП, который был получен с помощью метрологического АСМ с интерферометром. На рис. 2 показан профиль левой БС одного из выступов (увеличенный учас-

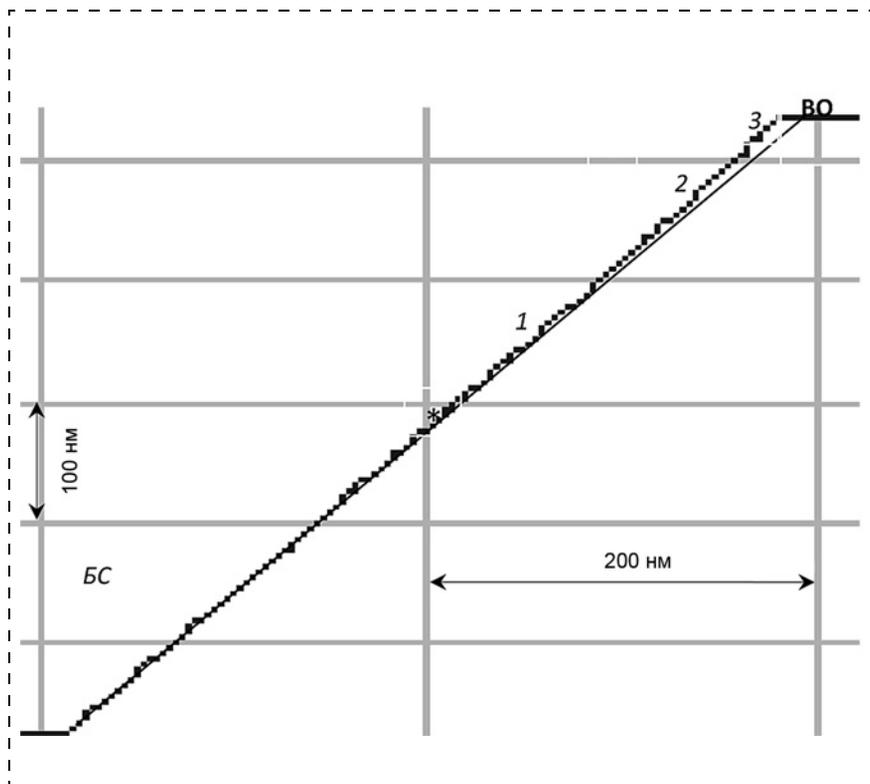


Рис. 2. Увеличенный участок профиля левой БС АТ-выступа из [7] (точки — результаты измерений профиля). Тонкая прямая аппроксимирует нижнюю часть профиля БС до точки обозначенной * и экстраполирует ее до ВО. Отклонение верхней части кривой БС от прямой происходит ступеньками 1, 2 и 3

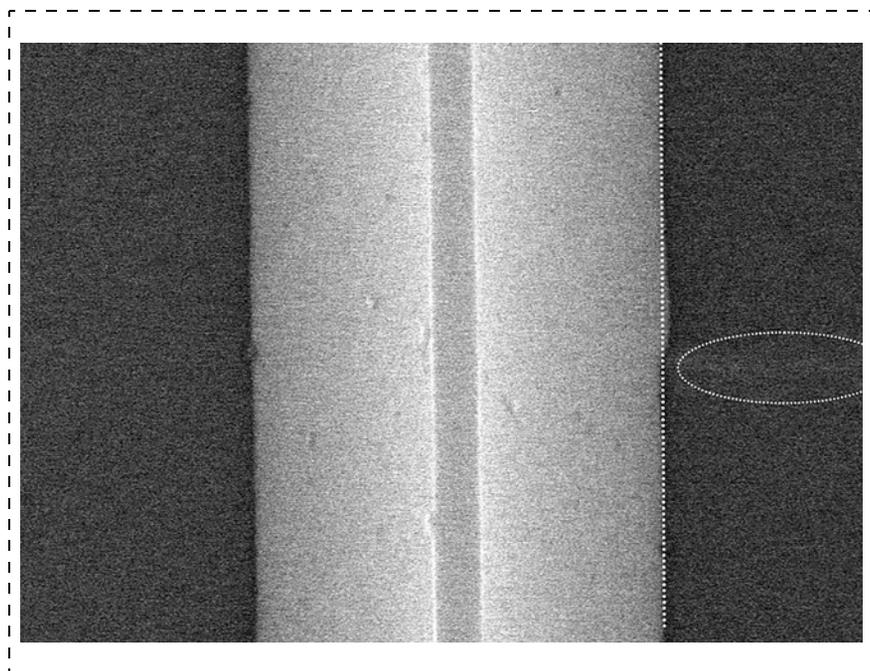


Рис. 3. РЭМ-изображение дефекта нижнего края правой БС в виде локального выгиба и его продолжение на нижнем плато справа от выступа в виде предполагаемой канавки. Эллипсом обведена нижняя граница канавки. Пунктирная линия обозначает нижний край БС

ток профиля, представленный в [7]). По параметрам профиля определили, что его высота составила $\sim 511,5$ нм. Профиль его правой БС может быть аппроксимирован прямой с локальными отклонениями от нее в виде шероховатостей, но для левой БС это сделать нельзя. Из рис. 2 видно, что с приближением линии БС к ВО эта линия отклоняется вверх от прямой, аппроксимирующей нижнюю часть БС и экстраполированную до ВО. Знак * обозначает точку, с которой начинается отклонение. Отклонение происходит последовательностью ступенек, обозначенных цифрами 1, 2, 3. Левая граница ВО отстоит от вершины угла трапеции, в которой линия ВО пересекается с аппроксимированной прямой БС, на 20...30 нм. Это отклонение уменьшило значение левой ширины проекции боковой стенки (ШПБС). Уменьшение ШПБС на локальном участке выступа на рис. 1, б может быть вызвано той же причиной.

На обсуждаемом выступе обнаружен другой дефект: высота с правой его стороны оказалась больше, чем с левой стороны на ~ 5 нм. Совместное влияние разности высотности и дефекта левой БС привело к тому, что ШПБС на левой стороне выступа составило ~ 724 нм, а на правой стороне — ~ 743 нм. Разности высотности обнаружены на других выступах в их последовательности из 10 штук на промежутке 20 мкм [7, fig. 10 c]. Ее максимальное значение равно ~ 10 нм. Все это свидетельствует о неравномерности АТ по площади пластины.

Существование разности высотности на выступах подтверждается рис. 3. На нем представлено РЭМ-изображение дефекта

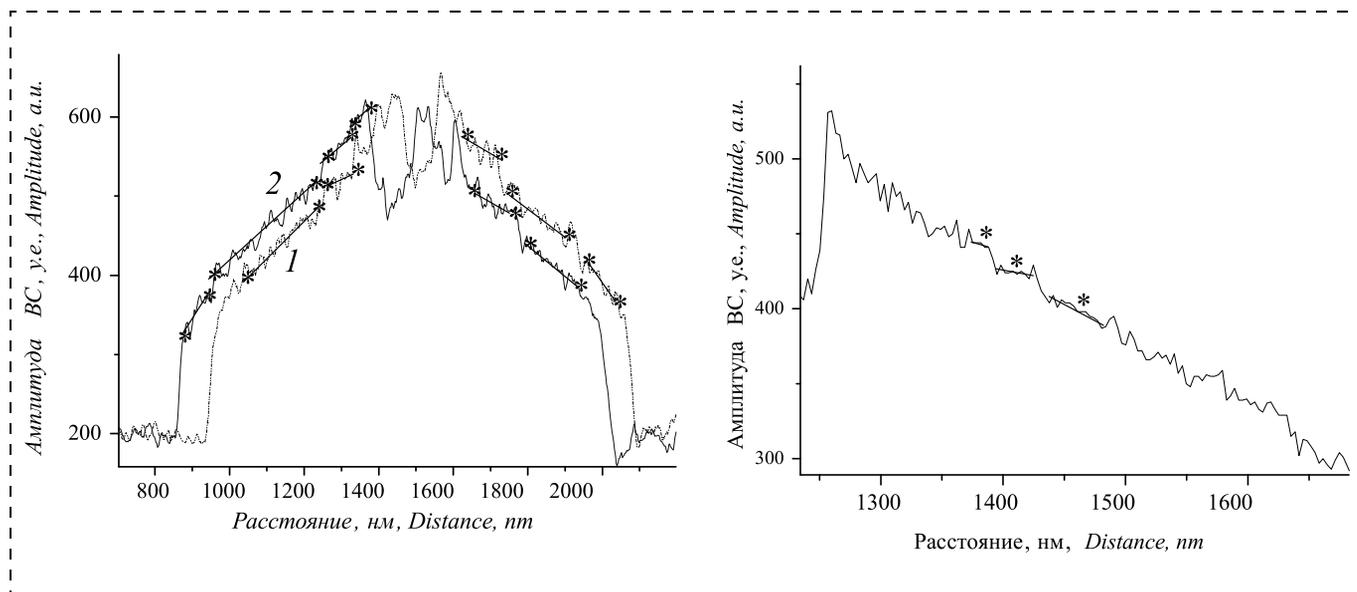


Рис. 4. Кривые ВС 1 и 2 от двух соседних выступов наложены на одно поле и сдвинуты по оси абсцисс (а). Видны плато ступенек (их границы обозначены *) и подъемы между ними. Их расположение на кривых 1 и 2 выглядит похожим. Кривая ВС от выступа с большей шириной ВО (б). Плато ступенек менее заметны и обозначены *

та правой БС с локальным выгибом линии ее нижнего края (бездефектный край показан пунктиром). На нижнем плато справа видно продолжение этого дефекта в виде ступеньки (обведен эллипсом). На участке нижнего плато, примыкающего к выгибу, должна существовать канавка. Виден лишь ее нижний край, а верхний пологий край незаметен. Источником дефекта выступа является локальный подтрав участка нижнего основания, который, на наш взгляд, неслучайно вытянут поперек выступа.

Искажение формы БС зафиксировано и на кривых видеосигнала (ВС) в РЭМ. На рис. 4, а показаны кривые ВС от соседних выступов, наложенные с небольшим сдвигом на одно поле для удобства сравнения. Амплитуда ВС для обеих кривых поднимается к ВО серией ступенек. Расположение ступенек на двух кривых представляется подобным. Это означает, что условия формирования ступенек на БС воспроизводятся на расстоянии 2 мкм друг от друга, а поэтому зависят от самих выступов, а не от случайного расположения ямок травления на поверхности БС. На рис. 4, б показана правая часть кривой ВС от другого выступа с шириной более 500 нм. Слабая тенденция к формированию ступенек на БС проявляется и здесь (отмечены звездочками), но на большинстве подобных выступов они вообще отсутствуют. Это означает, что искажение формы БС зависит от ширины выступов.

Обсуждение и анализ

Неопределенность размеров метрологической структуры зависит от ее исходного геометрического совершенства и отсутствия его деградации во времени. Для мер нанометрового диапазона должны быть реализованы наиболее жесткие требования к совершенству такой структуры. Оказалось, что реальные АТ-структуры не оправдывают в полной степени возлагавшихся на них надежд как на объекты с желаемыми совершенствами.

Еще в работе [8] выявилось, что на ВО выступов АТ-структуры с прямоугольным профилем сечения в мере SCCDRM имеются участки с неровными краями — шероховатостями (*line edge roughness — LER*). На расстояниях $P \approx 0,5$ мкм вдоль края отклонение линии ВО от прямой достигало $\sim 5...15$ нм, на малых расстояниях (с $P \approx 30...50$ нм) амплитуда шероховатости составила $\sim 2...3$ нм. При этом на отдельных участках линии ВО (протяженностью до 2 мкм) оба типа LER почти отсутствовали [8]. Таким образом, представление об атомарно-гладких плоскостях [111] на АТ-структурах на практике оправдалось лишь частично.

Для меры МШПС-2К требования к совершенству геометрии выступов должны быть более жесткими. Если для SCCDRM необходима лишь воспроизводимость расстояния между БС,

то для трапециевидного выступа необходима близость всех его наноучастков к идеальному, модельному профилю. При этом факторов, способных исказить профиль МШПС-2К, больше. В частности, дефиниционная неопределенность ширины ВО, связанная с закруглениями, составляет ~6...10 нм [6]. Но она возрастает при осаждении на поверхность контаминационного слоя в результате сканирования выступа в РЭМ. Оказалось, что даже несколько сканирований выступа в РЭМ с диффузионным вакуумным насосом обесценивают его аттестованные значения размеров [9]. Подобные искажения профиля отсутствуют для меры SCCDRM, сканируемой с помощью АСМ.

Потенциальным достоинством АТ-структур считались их "атомно-гладкие" участки поверхности и кристаллографически заданные углы между ними. Предполагалось, что эти совершенства позволят восстановить локально искаженные краевые наноучастки профиля, уменьшив неопределенность размеров вследствие закруглений на углах выступа. Но оказалось, что даже для протяженных участков поверхности [111] существуют отклонения от идеальности. Одним из источников отклонений является близость соседней поверхности на выступе или соседство иной поверхности (например, маски). Другими источниками отклонений оказались дислокации в кремнии, вызывающие механические напряжения вблизи от его поверхности. Их неравномерное, случайное распределение под поверхностью приводит к ячеистой ее структуре после АТ. Такая структура приводит к отклонению участков этой поверхности от исходной плоскости [111], а поэтому и к отличию углов в профиле выступа на этих участках от значений, определяемых взаиморасположением кристаллических плоскостей. Подобное искажение было обнаружено еще в работе [6] в виде отклонения линии ВС в РЭМ на участке ВС от прямой вблизи ВО. Оно обычно случалось на выступах с шириной ВО менее нескольких десятков нанометров и практически отсутствует на более широких ВО.

Выяснилось, что неплоскостность участков поверхности ВС может быть связана с геометрией выступа. Так, характер чередования наноступенек на боковых стенках соседних выступов хорошо воспроизводится (рис. 4, а) и едва ли может быть случайным. По нашему мнению, отклонение участков профиля ВС от идеальных проис-

ходит вследствие неравномерного распределения механических напряжений вдоль поверхности ВС. Эти напряжения подобны тем, которые вызываются подповерхностными дислокациями, и также зависят от их размеров, но в нашем случае они зависят от размеров выступов. Для выступов с шириной ВО несколько десятков нанометров поверхностные напряжения предположительно более концентрированы на краях и поэтому заметно влияют на форму профиля ВС.

Любопытные данные о несовершенствах боковых стенок выступов в отдалении от их краев были получены для меры IVPS-100-РТВ [10]. Их оценивали двумя методами: по профилю сечения выступа в ПЭМ и по данным сканирования ВС этого выступа с помощью АФМ в специальном VAP-режиме [10]. Участок контроля ВС на ПЭМ-изображениях и на АСМ-сканах был расположен на 100 нм ниже ВО выступа. Оценивали отклонения участков линий ВС от вертикальности и их LER (шероховатости) вдоль вертикального (ПЭМ) и горизонтального направлений поверхности ВС (АСМ). По ПЭМ-изображению значения LER определяли на длине 40 нм в сечении выступа, по АСМ-изображению — вдоль оси выступа на длине около 1,5 мкм.

Выявилось, что угол отклонения прямой линии, которая аппроксимирует линию ВС, от вертикальной линии не превышает $0,5^\circ$. Такой угол привел бы к отклонению противоположного края аппроксимированной линии ВС от вертикали длиной ~500 нм (протяженность ВС в выступе МШПС-2К) на ~4 нм. Это почти в пять раз меньше, чем для соответствующего отклонения, показанного на рис. 2. Значение LER на поверхности ВС вдоль оси выступа составило [10] менее 1 нм, в вертикальном направлении — ~0,1 нм. Обнаруженную зависимость LER от направления сканирования авторы объяснили технологией травления. Шероховатости видны и вдоль линии ВС на рис. 2. Сложно определить значение LER вдоль этой линии. Однако можно оценить наибольшее отклонение от средней линии ВС (R_z): на рис. 2 оно составляет ~3...4 нм, для ВС меры IVPS-100-РТВ — менее 1 нм [10].

Разница в шероховатости и отклонениях ВС от плоскостности для близких по размерам выступов МШПС-2К и IVPS-100-РТВ могут быть объяснены различными вариантами технологии АТ. Детали их неизвестны, однако известны специальные требования к совершенству формы АТ-выступов создателями эталонов с вертикаль-

ными БС. Так, на этапе разработки SCCDRM в NIST были проведены исследования по оптимизации технологии создания АТ-структур как для достижения минимального размера, так и для получения минимальной шероховатости [11]. Оказалось, что технологические параметры, позволяющие достигнуть минимальных значений указанных величин, разные.

В требованиях для МШПС-2К и в условиях ее поверки в ГОСТах [12, 13] параметр шероховатости вообще не упомянут. Лишь в свидетельстве на тип средства измерений [14] дано ограничение на неравномерность ширины ВО выступа в 5 нм (δ). Однако методики измерения шероховатости и учета ее значения при измерении ширины ВО с "...абсолютной погрешностью измерений значений, не превышающих 0,1 нм..." [13] нам найти не удалось. Создается впечатление, что разработчики МШПС-2К априорно надеялись на полное соответствие формы реального профиля модельному.

Заключение

Предполагалось, что топологические структуры, созданные анизотропным травлением (АТ) кремния, способны реализовать наиболее жесткие метрологические требования к совершенству объектов измерения. В результате работы выяснилось, что реальные АТ-структуры (созданные на основе АТ) не оправдывают в полной степени возлагавшихся на них надежд, как на объекты с желаемыми совершенствами.

Потенциальными совершенствами АТ-структур представлялись атомно-гладкие плоскости, сходящиеся под известными кристаллографическими углами и формирующие границы в виде прямых линий. В работе выяснилось, что наиболее совершенная поверхность [111], формирующая боковые стенки АТ-структур, способна заметно отклоняться от плоскости. Профиль сечения этой поверхности не является прямой линией, а углы в профиле сечения АТ-структуры могут отличаться от значений, предсказанных для них теоретически. Полученные нами результаты для метрологических наноструктур подтверждаются данными из литературных источников, посвященных исследованию дефектов травления поверхности [111]. Сделано предположение, что вероятным источником искажения профиля являются напряжения, возникающие

на углах формируемой АТ-структуры. Они могут увеличиваться с уменьшением ее размера. Меньшее отклонение от плоскости [100] для участка ВО возникает вследствие подтравки кремния под маску в ходе АТ.

Список литературы

1. **Dai G., Koenders L., Fluegge J., Bosse H.** Two approaches for realizing traceability in nanoscale dimensional metrology // *Opt. Eng.* 2016. Vol. 55 (9), 091407.
2. **Ларионов Ю. В.** Сравнение линейных размеров в диапазоне менее 50 нм, полученных с помощью растрового и просвечивающего электронных микроскопов: Анализ результатов // *Нано- и микросистемная техника.* 2020. Т. 22, № 1. С. 3–10.
3. **Международный словарь по метрологии.** Основные понятия и соответствующие термины. Санкт-Петербург: НПО "Профессионал", 2010. 81 с.
4. **Nijdam A. J.** Anisotropic wet-chemical etching of siliconpits, peaks, principles, pyramids and particles // *Ph. D. thesis, University of Twente, Enschede, the Netherland* 2001. ISBN 90 365 15351.
5. **Gosalvez M. A., and Nieminen R. M.** Surface morphology during anisotropic wetchemical etching of crystalline silicon // *New Journal of Physics.* 2003. Vol. 5. 100.1–100.28. URL: <http://www.njp.org/>.
6. **Ларионов Ю. В.** Сравнение размеров, измеренных растровым и просвечивающим электронными микроскопами, в диапазоне менее 50 нм // *Нано- и микросистемная техника.* 2019. Т. 21, № 11. С. 643–651.
7. **Frase C., Hassler-Grohne W., Dai G., Bosse H.** et al. SEM linewidth measurements of anisotropically etched silicon structures smaller than 0.1 μm // *Meas. Sci. Technol.* 2007. Vol. 18. P. 439–447.
8. **Cresswell M. W., Davidson M., Mijares G. I.** et al. Mapping the Edge of Test-Structure Features for Nanometer-Level CD Reference-Materials // *Proc. of Int. Conf. on Microelectronic Test Structures for reference materials, CA.* 2009. P. 84–90.
9. **Ларионов Ю. В.** Изменение значения ширины выступа в результате его сканирования в РЭМ // *Нано- и микросистемная техника.* 2020. Т. 22, № 5. С. 234–258.
10. **Dai G., Zhu F., Heidelmann M.,** et al. Development and characterisation of a new linewidth reference material // *Measurement Science and Technology.* 2015. Vol. 26, N. 11.
11. **Dixon R. G., Guffrei W. F., Cresswell M.** et al. Single crystal critical reference material (SCCDRM): Process optimization for the next generation of standards // *Proc. of SPIE.* 2007. Vol. 6518. N. 651815-15. P. 1–11.
12. **Меры рельефные нанометрового диапазона из монокристаллического кремния.** ГОСТ Р 8.628.2007. М.: Стандартинформ, 2007.
13. **Меры рельефные нанометрового диапазона с трапециoidalным профилем элементов.** Методика поверки. ГОСТ 8.629–2007. М.: Стандартинформ, 2007.
14. **Свидетельство об утверждении типа средств измерений RU. С.27.010.А № 26441** Меры ширины и периода специальные МШПС-2.0 К. Регистрационный № 33598-06.

Yu. V. Larionov, Senior Researcher, luv@kapella.gpi.ru,
Moscow, A. M. Prokhorov General Physics Institute, Russian academy of Science, Moscow, 119991,
Russian Federation

Corresponding author:

Larionov Yuriy V., Senior Researcher, Moscow, A. M. Prokhorov General Physics Institute, Russian academy of Science,
Moscow, 119991, Russian Federation
E-mail: luv@kapella.gpi.ru

Geometry of Structures Developed by Anisotropic Etching in the Nanometer Range

Received on April 01, 2021

Accepted on April 12, 2021

Geometric disadvantages of nanostructure surface developed by anisotropic etching of silicon are discussed. These disadvantages increase uncertainty of its sizes and impeded its using as an etalons for linear measurements. The greatest uncertainty are observed for structures with trapezoid profile. They make up due to defects on sidewalls of etched structures. The surface of a sidewall is proposed to be disposed in the [111] plane and so be absolutely flat. Really parts of a sidewall surface are deflected in stepwise way from the plane [111]. This phenomenon leads to deflection of angles between converging flat sections of etched structure from its known values for silicon. Consequence of this is most drastic to a measure MShPS-2K due to its structure, technology of anisotropic etching and absence of required control. Sources of these surface disadvantages induced by anisotropic etching are discussed. Possibilities to decrease disadvantages are evaluated.

Keywords: anisotropic etching, MShPS-2K, SCCDRM, IVPS -100-PTB, nanometrology, SEM, TEM, ASM

For citation:

Larionov Yu. V. Geometry of Structures Developed by Anisotropic Etching in the Nanometer Range, *Nano- i mikrosistemnaya tekhnika*, 2021, vol. 23, no. 3, pp. 131–138.

DOI: 10.17587/nmst.23.131-138

References

1. **Dai G., Koenders L., Fluegge J., Bosse H.** Two approaches for realizing traceability in nanoscale dimensional metrology, *Opt. Eng.* 55 (9), 091407 (2016).
2. **Larionov Yu. V.** Svravnenie lineinikh razmerov v diapazone menee 50 nm poluchennikh s pomoshchyu rastrovogo I prosvechivayushchego elektronnikh mikroskopov, *Nano- i mikrosistemnaya tekhnika*, 2020, vol. 22, no. 1, pp. 3–10.
3. **Medzunarodnii slovar' po metrologii.** Osnovnie ponyatiya i sootvetstvuyushchie termini. Sankt-Peterburg, NPO Professional, 2010. 81 c.
4. **Nijdam A. J.** Anisotropic wet-chemical etching of silicon pits, peaks, principles, pyramids and particles, *Ph. D. thesis*, University of Twente, Enschede, the Netherland, 2001.
5. **Gosalvez M. A., Nieminen R. M.** Surface morphology during anisotropic wetchemical etching of crystalline silicon, *New Journal of Physics*, 2003, vol. 5, pp. 100.1–100.28. URL: <http://www.njp.org/>.
6. **Larionov Yu. V.** Svravnenie razmerov izmerennikh rastrovim i prosvechivayushchim mikroskopami v diapazone menee 50 nm, *Nano- i mikrosistemnaya tekhnika*, 2019, vol. 21, no. 11, pp. 643–645.
7. **Frase C., Hassler-Grohne W., Dai G., Bosse H.** et al. SEM linewidth measurements of anisotropically etched silicon structures smaller than 0.1 μm , *Meas. Sci. Technol.*, 2007, vol. 18, pp. 439–447.
8. **Cresswell M. W., Davidson M., Mijares G. I.** et al. Mapping the Edge of Test-Structure Features for Nanometer-Level CD Reference-Materials, *Proc. of Int. Conf. on Micro-electronic Test Structures for reference materials*, CA, 2009, pp. 84–90.
9. **Larionov Yu. V.** Izmeneniye znacheniya shirini vistupa v rezultate ego skanirovaniya v REM, *Nano- i mikrosistemnaya tekhnika*, 2020, vol. 22, no. 5, pp. 234–258.
10. **Dai G., Zhu F., Heidelmann M.**, et al. Development and characterisation of a new linewidth reference material, *Measurement Science and Technology*, 2015, vol. 26, no. 11.
11. **Dixon R. G., Guffrei W. F., Cresswell M.** et al. Single crystal critical reference material (SCCDRM): Process optimization for the next generation of standards, *Proc. of SPIE*, 2007, vol. 6518, no. 651815, pp. 1–11.
12. **Meri** rel'efnie nanometrovnogo diapazona iz monokristallicheskogo kremniya. Natsional'nii standart RF, GOST R8.628.2007. Moscow, Standatrinform, 2007.
13. **Meri** rel'efnie nanometrovnogo diapazona s trapetsoidalnim profilem elementov. Metodika poverki. GOST R8.629.2007. Moscow, Standatrinform, 2007.
14. **Svidetel'stvo** ob utverdenii tipa sredstv izmerenii RU. C.27.010.A № 26441. Meri shirini I perioda spetsialnie MShPS-2K. Federalnoe agenstvo po tekhnicheskomu regulirovaniyu.

МОДЕЛИРОВАНИЕ И КОНСТРУИРОВАНИЕ МНСТ MODELLING AND DESIGNING OF MNST

УДК 621.372.543.2

DOI: 10.17587/nmst.23.139-147

А. С. Койгеров, канд. техн. наук, доц., a.koigerov@gmail.com,
Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет "ЛЭТИ"

ЛЕСТНИЧНЫЕ ФИЛЬТРЫ НА ВЫТЕКАЮЩИХ ПОВЕРХНОСТНЫХ АКУСТИЧЕСКИХ ВОЛНАХ НА ПОДЛОЖКЕ НИОБАТА ЛИТИЯ

Поступила в редакцию 28.02.2021

Рассмотрен принцип построения и работы лестничных фильтров на поверхностных акустических волнах. Предложена методика извлечения параметров, необходимых для расчета фильтров методом связанных мод на базе P -матрицы. Методика построена на анализе бесконечных периодических электродов методом конечных элементов. На основе предложенной теории спроектированы и изготовлены полосовые фильтры с относительной полосой пропускания 8...12 % на подложке сильного пьезоэлектрического материала $49^\circ YX LiNbO_3$, для которого основным типом волны является вытекающая поверхностная акустическая волна. Показано, что для данного материала при расчете необходимо учитывать прямое излучение объемных волн, поскольку при проектировании лестничных фильтров излучение попадает в проектируемую полосу пропускания фильтров. Приведенные расчеты подтверждены результатами экспериментов.

Ключевые слова: *поверхностные акустические волны, вытекающая ПАВ, резонатор, лестничные фильтры, метод связанных мод, метод конечных элементов, собственные частоты, объемные акустические волны, пьезоэлектрическая подложка, широкополосный фильтр, ниобат лития*

Введение

Применение фильтров на поверхностных акустических волнах (ПАВ) представляет практический интерес в беспроводных системах радиосвязи на частотах до 2,5 ГГц. Для реализации фильтров с относительной полосой пропускания более 6 % можно воспользоваться конструкцией резонаторного фильтра лестничного типа, но необходимо использовать сильные пьезоэлектрические материалы, т. е. материалы с большим значением коэффициента электромеханической связи.

Для реализации высоких требований к электрическим характеристикам данного типа фильтров на ПАВ, таких как минимум неравномернос-

ти амплитудно-частотной характеристики (АЧХ) в полосе пропускания, минимум потерь в полосе пропускания, гарантированное подавление в полосе заграждения, коэффициент прямоугольности, требуется не только очень точно выбрать все параметры топологии отдельных резонаторов, входящих в фильтр, но и владеть на стадии проектирования хорошей расчетной теорией и необходимыми параметрами материалов для выбранной модели расчета.

В работах [1–4] представлен синтез и анализ конструкций лестничных фильтров на ПАВ на срезах танталата лития $42^\circ YX LiTaO_3$ и ниобата лития $64^\circ YX LiNbO_3$, что позволило реализовать фильтры с относительными полосами пропускания до 5 %.

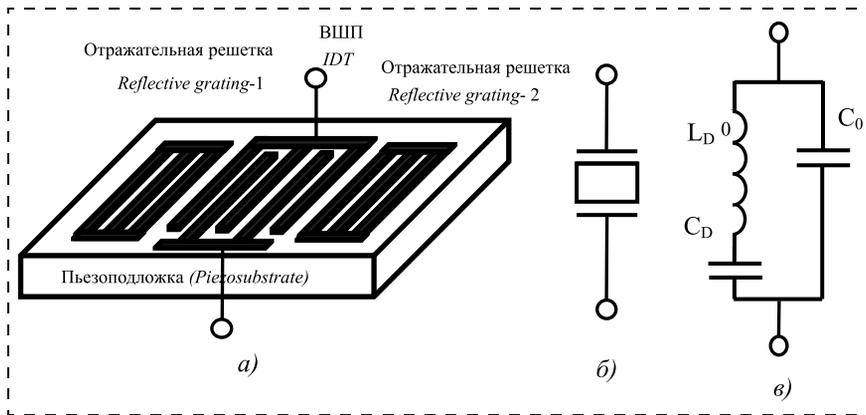


Рис. 1. Схемы однопортового резонатора на ПАВ:
 а — конструктив и топология; б — схематическое обозначение; в — BVD-модель

В данной работе рассмотрены вопросы, посвященные проектированию лестничных ПАВ-фильтров на срезе ниобата лития $49^\circ YX LiNbO_3$, имеющего коэффициент электромеханической связи $K^2 = 15,7\%$ [5], основной волной которого является вытекающая (или "псевдо") ПАВ (в англ. *LSAW* — *leak surface acoustic wave*).

В качестве расчетной модели выбран метод связанных мод на основе P -матриц, достоинством которого является простота реализации и быстрота вычислений.

Цель настоящей работы — показать на примере сравнения расчетных и экспериментальных характеристик лестничных фильтров правомерность применения ключевых параметров, полученных в результате расчетов для бесконечной периодической структуры, при вычислении характеристик конечных конструкций реальных встречно-штыревых преобразователей (ВШП) и решеток отражателей.

1. Принципы построения и работы лестничных фильтров

Основным элементом для построения лестничных фильтров является однопортовый резонатор (рис. 1). Конструктивно резонатор на ПАВ состоит из ВШП и отражательных решеток, расположенных на подложке из пьезоэлектрического материала (рис. 1, а). Апертура, число электродов в ВШП и отражательных решетках определяют электрическую проводимость Y_{11} однопортового резонатора, которая, в свою очередь, связана с коэффициентом передачи.

Модуль электрической проводимости резонатора имеет ярко выраженный максимум в точке на резонансной частоте F_R и минимум в точке

антирезонанса на частоте F_A . Для приближенной оценки резонансов эквивалентную схему резонатора можно представить в виде известной схемы (рис. 1, в) с тремя элементами резонаторной цепи *Butterworth-Van Dyke (BVD)* [6], пренебрегая потерями. Динамическая индуктивность L_D и емкость C_D определяют последовательный резонанс F_R , в то время как антирезонанс F_A определяется совместным параллельным включением L_D , C_D и статической емкости C_0 .

$$F_R = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_D C_D}};$$

$$F_A = F_R \sqrt{1 + \frac{C_D}{C_0}}.$$

И как видно, частота антирезонанса F_A всегда больше частоты F_R .

Элементарным звеном лестничного фильтра является Г-образное звено, состоящее из последовательно включенного резонатора S и параллельно подключенного на землю резонатора P . На рис. 2 и 3 показан принцип формирования коэффициента передачи элементарного Г-звена. На рис. 2 показаны модули проводимости каж-

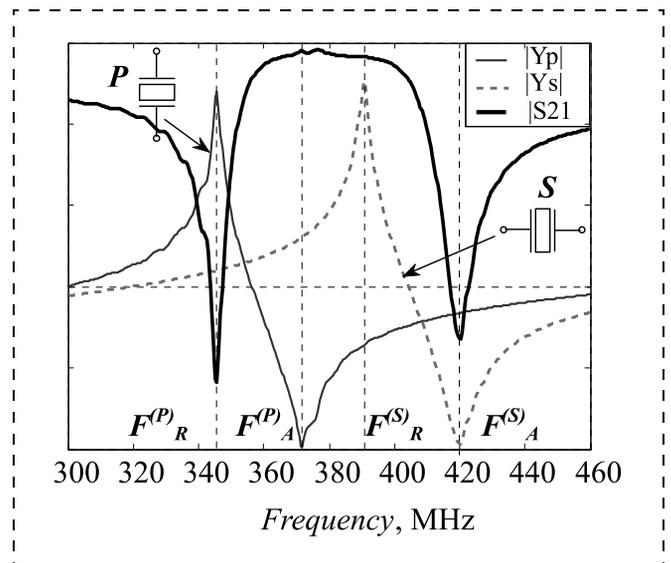


Рис. 2. Принцип формирования коэффициента передачи Г-звена лестничного фильтра на основе сравнения с модулем проводимости отдельных резонаторов

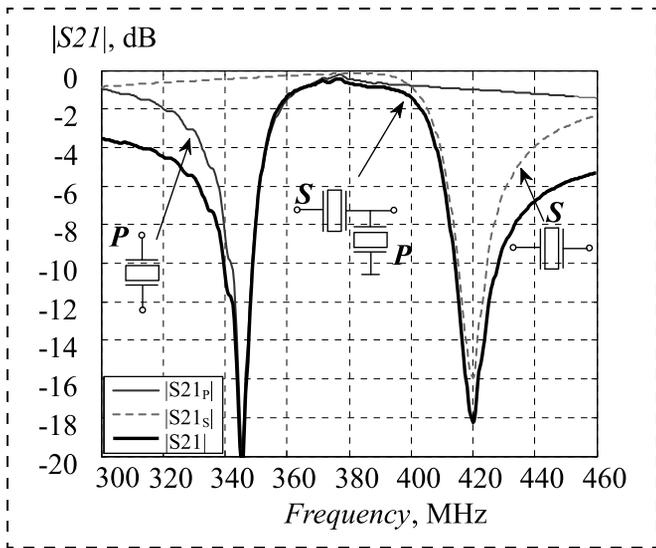


Рис. 3. Принцип формирования коэффициента передачи Г-звена лестничного фильтра на основе сравнения отдельных АЧХ каждого резонатора

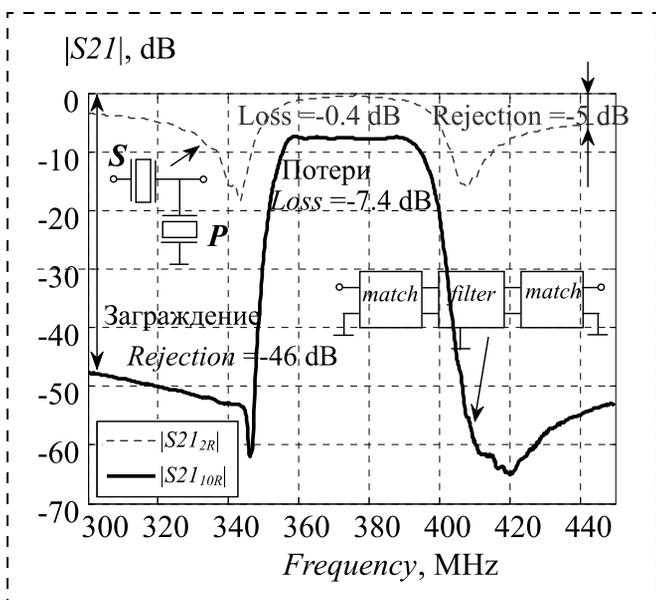


Рис. 4. Расчетная АЧХ Г-звена и экспериментальная АЧХ лестничного фильтра, состоящего из 10 резонаторов

ного из резонаторов, формирующего Г-звену относительно коэффициента передачи данного звена. На рис. 3 представлены коэффициенты передачи каждого резонатора и показан вклад каждого в совместную характеристику коэффициента передачи. На рис. 4 представлена расчетная АЧХ элементарного Г-звена, состоящего из двух резонаторов, и экспериментально снятая АЧХ фильтра, состоящего из пяти Г-звеньев (10 резонаторов). Как видно, с ростом числа звеньев пропорционально увеличивается затухание в полосе

заграждения и неизбежно растут потери в полосе пропускания. Небольшой неравномерности в полосе пропускания можно добиться, используя дополнительные цепи согласования на входе и выходе фильтра.

2. Физико-математическая модель P -матрицы для расчета одноходового резонатора

Одной из наиболее известных методик расчета топологий устройств на ПАВ является метод связанных мод (англ. *coupled of mode (COM)*) [7–9]. На основе уравнений для связанных волн построен расчет, применимый к встречно-штыревым преобразователям и отражательным структурам любого типа, в том числе к аподизованным преобразователям с линейной топологией и произвольно меняющимся периодом и полярностью подключения электродов к контактным шинам, и произвольно меняющимся шагом отражательных структур. Для формализации процесса вычисления уравнения связанных волн удобно представить в матричной форме — метод P -матриц (рис. 5). В рамках метода P -матрицы устройство на ПАВ представляется в виде комбинации отдельных элементов (электродов ВШП или полосок отражательных решеток), для которых вычисляются соответствующие им P -матрицы (связывающие комплексные амплитуды волн на входе и выходе элемента).

Акустические компоненты P_{11} , P_{12} , P_{21} , P_{22} описывают коэффициенты передачи и отраже-

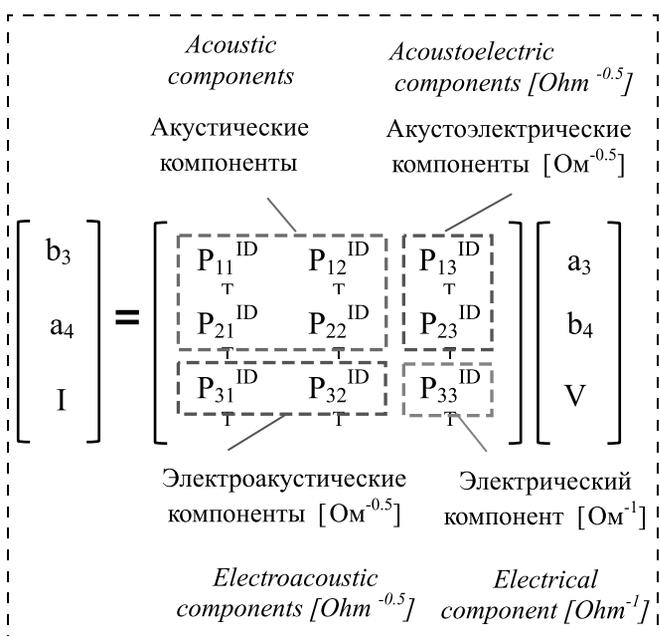


Рис. 5. Основы метода P -матриц

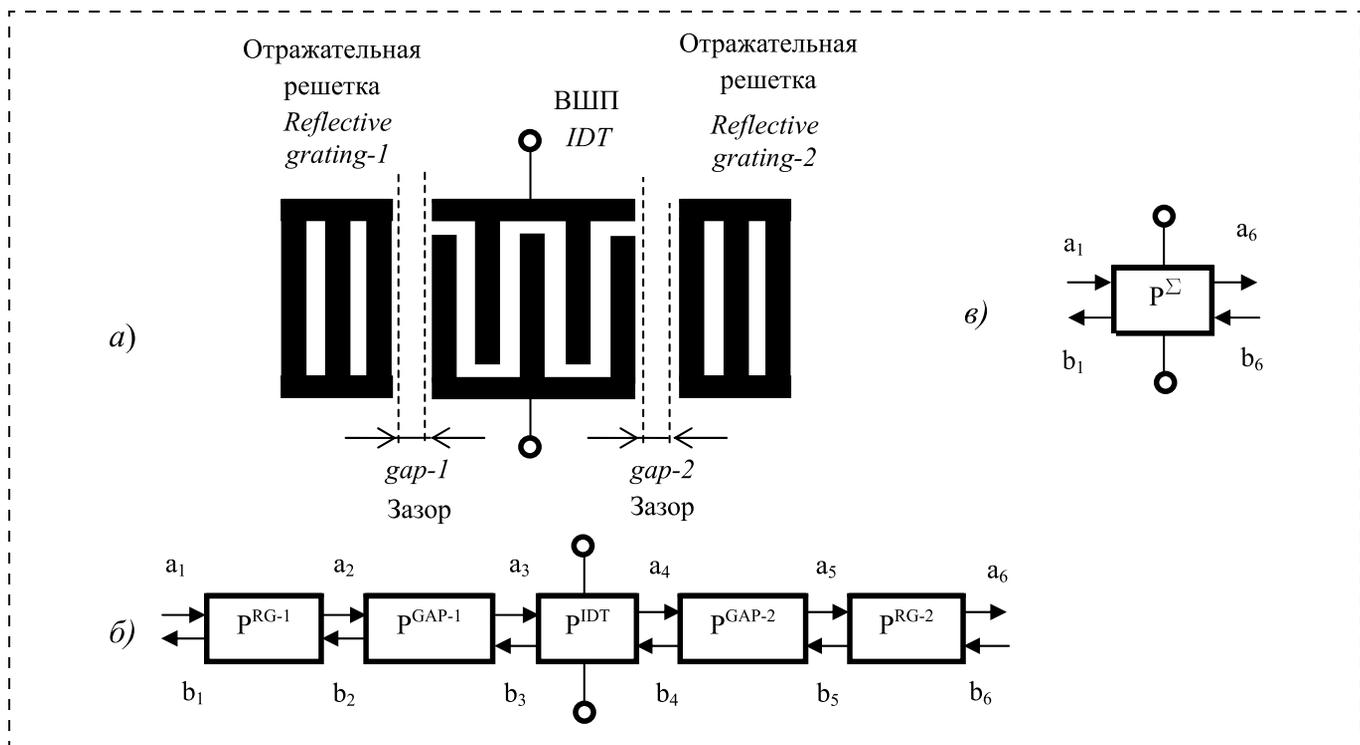


Рис. 6. Схемы резонатора на ПАВ:

a — топология; *б* — эквивалентная акустоэлектронная схема устройства; *в* — преобразованная схема

ния по акустическим портам. Акустоэлектрические компоненты P_{13} , P_{23} показывают эффективность возбуждения поверхностных акустических волн посредством подачи напряжения V на шины ВШП. Электроакустические компоненты P_{31} , P_{32} характеризуют эффективность преобразования ПАВ в электрический ток I в шинах ВШП. Элемент P_{33} соответствует проводимости ВШП.

Последовательность действия при использовании метода P -матриц следующая:

- составляется эквивалентная акустоэлектрическая схема выбранной конструкции (рис. 6, *a*, *б*);

- вычисляются P -матрицы всех элементарных звеньев устройства (см. рис. 5);

- вычисляется суммарная P -матрица (P^Σ), определяющая связь комплексных амплитуд волн на входе и выходе ПАВ-структуры в целом (рис. 6, *в*).

Компоненты суммарной P -матрицы акустического канала (P^Σ) могут быть вычислены перемножением соответствующих компонентов для ОС и ВШП. Условно запишем:

$$P^\Sigma = P^{RG-1} \times P^{GAP-1} \times P^{IDT} \times P^{GAP-2} \times P^{RG-2}.$$

Отметим, что искомую проводимость Y_{11} определяет элемент P_{33} суммарной матрицы канала.

От Y_{11} переходим к коэффициенту передачи. Таким образом, можно рассчитать любой одно-входовой резонатор на ПАВ.

Компоненты P -матрицы:

$$P_{11} = r \exp(-jkp),$$

где r — комплексный коэффициент отражения от электрода; p — период следования электродов;

$$P_{12} = k_r \exp(-jkp),$$

где k_r — коэффициент прохождения через электрод; k — волновое число, $k = 2\pi f/V - j\gamma$; V — фазовая скорость под электродом; γ — потери при распространении.

P_{13} , P_{23} , P_{31} , P_{32} прямо пропорциональны значению КЭМС или коэффициенту преобразования m . Элемент P_{33} суммарной матрицы канала определяет искомую проводимость ВШП Y и определяется по формуле

$$P_{33} = Y(\omega) = G_a(\omega) + jB_a(\omega) + j\omega C_0,$$

где $G_a(\omega)$ и $B_a(\omega)$ — соответственно активная и реактивная составляющие проводимости излучения; C_0 — статическая емкость. Для анализа ус-

тройств необходимо определить все компоненты P -матрицы [7–9].

Компоненты P -матрицы должны подчиняться следующим правилам [7–8]:

1) выполнение условий взаимности:

$$P_{21} = P_{12}; \quad P_{31} = -2P_{13}; \quad P_{32} = -2P_{23};$$

2) закон сохранения энергии:

$$G_a = \operatorname{Re}\{P_{33}\} = |P_{13}|^2 + |P_{23}|^2.$$

Для нахождения всех компонент P -матрицы необходим набор параметров (SOM -параметров). О некоторых из них пойдет речь в данной работе:

V — фазовая скорость под отражателем (электродом);

r — комплексный коэффициент отражения от электрода;

m — коэффициент акустоэлектронного преобразования.

Все SOM -параметры имеют зависимость:

— от нормированного отношения h/λ ;

— от коэффициента металлизации K_m ;

— от типа топологии (расщепленный, нерасщепленный электрод, различное число и ширина электродов на период).

Наиболее распространенными способами получения SOM -параметров являются два способа:

1) извлечение параметров из экспериментальных данных с последующим построением эмпирических зависимостей необходимых параметров [10]; 2) получение параметров с помощью различных расчетов методом конечных элементов без проведения многочисленных реальных экспериментов [11].

Такие программные пакеты, как *COMSOL Multiphysics* или *ANSYS Multiphysics*, работа которых основана на методе конечных элементов, позволяют моделировать устройства на ПАВ. Например, в работе [12] показана работа с пакетом *COMSOL Multiphysics* во временной области, в работах [13, 14] — в частотной области. Данные пакеты могут помочь решить задачу извлечения необходимых SOM -параметров.

3. Особенности извлечения некоторых SOM -параметров с помощью метода конечных элементов

Для извлечения SOM -параметров применяют методику, известную как FEM -анализ (FEM — *finite element method*) собственных частот. По этой методике вместо затухающей бегущей волны рас-

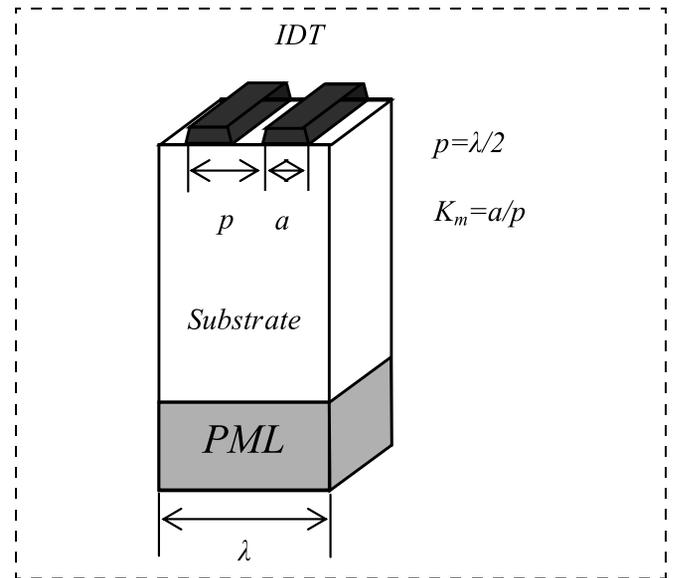


Рис. 7. Ячейка ВПП для анализа МКЭ

сматривают незатухающие стоячие волны, для которых можно определить собственные частоты. Тестовая ячейка (рис. 7) представляет собой структуру, состоящую из двух электродов, расположенных на подложке $49^\circ YX \text{ LiNbO}_3$. Ширина электрода — $\lambda/4$. Размер ячейки — одна длина волны λ . Граничные условия заданы таким образом, что считаем данную структуру бесконечной периодической решеткой металлических электродов. На нижнем торце подложки расположен идеально согласованный слой *Perfectly Matched Layer (PML)*, поглощающий исходящие волны для ограничения области численного моделирования.

Суть заключается в нахождении собственных частот поверхностных волн тестовой ячейки в соответствующих областях:

— свободная поверхность (рис. 8, см. третью сторону обложки);

— полностью металлизированная поверхность (рис. 8, см. третью сторону обложки);

— поверхность с электродами (рис. 9, см. третью сторону обложки).

В отсутствие электродов существует одна собственная частота, которая позволяет рассчитать фазовую скорость ПАВ V_{free} на свободной поверхности $V_{\text{free}} = F_0\lambda$.

В присутствии электродов существуют две собственные частоты. F_{S1} , F_{S2} — частоты, соответствующие левому и правому краю полосы непропускания для короткозамкнутой решетки; F_{O2} , F_{O1} — для открытой (не короткозамкнутой) решетки.

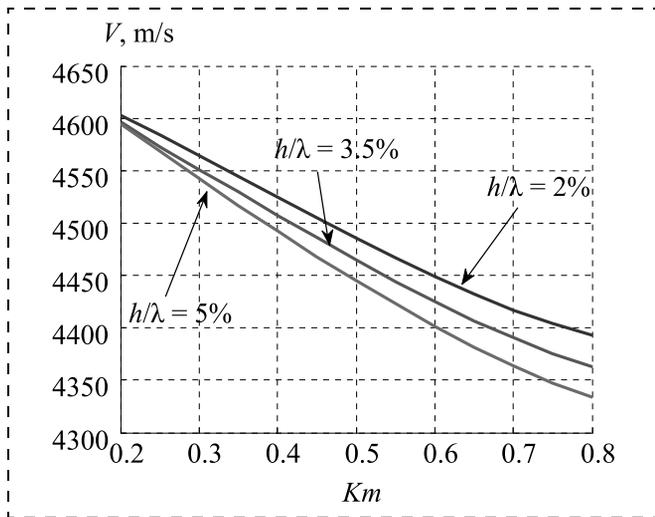


Рис. 10. Фазовая скорость под электродами в зависимости от коэффициента металлизации для значений $h/\lambda = 2, 3,5$ и 5% соответственно

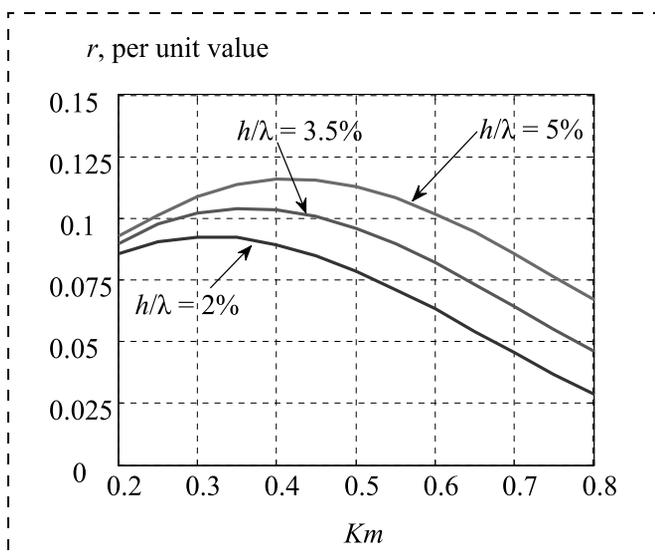


Рис. 11. Коэффициент отражения от единичного электрода в зависимости от коэффициента металлизации для значений $h/\lambda = 2, 3,5$ и 5% соответственно

Зная все эти собственные частоты, можно вычислить:

1) фазовую скорость под электродом короткозамкнутой решетки:

$$V = (F_{S1} + F_{S2})p;$$

2) коэффициент отражения на один электрод короткозамкнутой решетки:

$$r = \pi((F_{S2} - F_{S1})/(F_{S2} + F_{S1}));$$

3) коэффициент преобразования:

$$m = \pi[(F_{O2} + F_{O1}) - (F_{S2} + F_{S1})]/(F_{S2} + F_{S1}).$$

Зависимости фазовой скорости и коэффициента отражения представлены на рис. 10 и 11 соответственно.

Таким образом, находят так называемые *СОМ*-параметры или параметры связанных мод для поверхностной акустической волны. Нерассмотренными остались вопросы потерь, а известно, что потери в устройстве состоят из многих источников, таких как вытекающая природа волн для данного материала, резистивные потери в электродах ВШП, дифракция акустических волн, потери за счет вязкостных свойств материала. По данной теме есть ряд публикаций [14–16], которые отражают подход по изучению источников потерь. Кроме того, нужно помнить еще один источник потерь — возбуждение объемных типов волн *BAW* (*bulk acoustic wave*) в ВШП. Анализ полной проводимости периодической тестовой структуры показал (рис. 12), что кроме основной, вытекающей поверхностной акустической волны (*LSAW*) в правой части частотной характеристики присутствует как раз излучение объемных акустических волн (*OAB*).

Наличие *OAB* существенно искажает частотную характеристику в полосе пропускания лестничного фильтра, поскольку для резонатора типа *P* (параллельного резонатора) частоты, на которой идет излучение, *OAB* попадают в полосу пропускания проектируемого фильтра. Поэтому необходимо оценивать вклад *OAB* в общую характеристику.

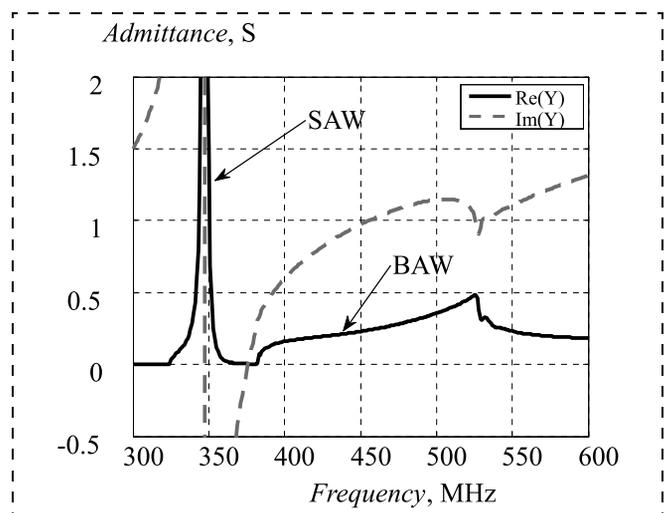


Рис. 12. Частотная зависимость проводимости периодического преобразователя для вытекающих ПАВ на 49° YX $LiNbO_3$ при толщине металлизации $h/\lambda = 3,5\%$ и коэффициенте металлизации $K_m = 0,5$

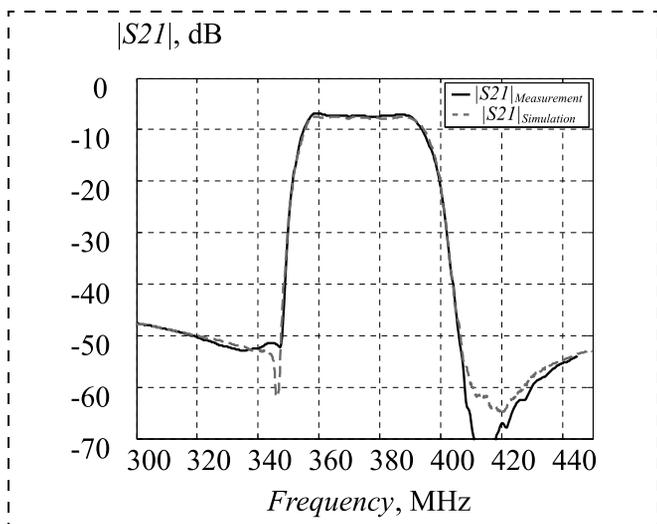


Рис. 13. Расчетная и измеренная АЧХ фильтра № 1

Можно разложить полную проводимость на три составляющие [18]:

$$Y = Y_{LSAW} + j\omega C_0 + Y_{BAW},$$

где Y_{LSAW} — проводимость, отвечающая за вытекающие ПАВ; Y_{BAW} — излучение объемных акустических волн; C_0 — статическая емкость.

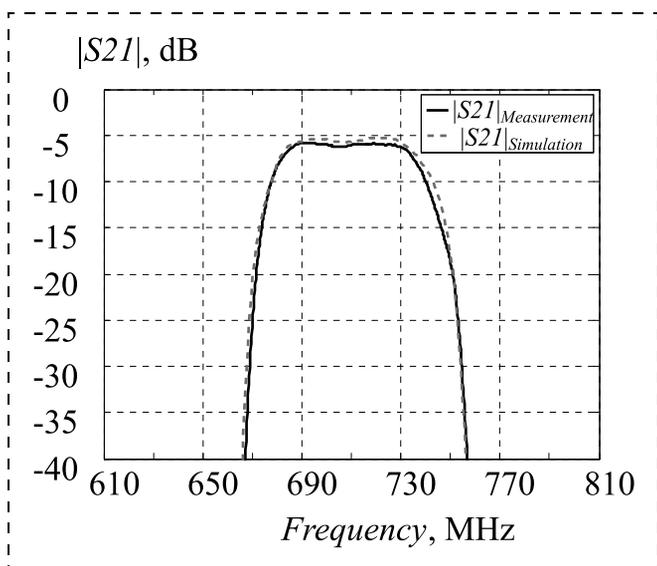


Рис. 14. Расчетная и измеренная АЧХ фильтра № 2

Только Y_{LSAW} зависит от извлеченных COM -параметров и определяется компонентой P_{33} из теории P -матрицы, а для учета Y_{BAW} необходимо отдельно снимать частотную зависимость проводимости и добавлять к P_{33} .

4. Результаты эксперимента

Предложенным способом был спроектирован ряд лестничных фильтров на однопортовых резонаторах на вытекающих ПАВ. В качестве пьезоэлектрического материала был выбран $49^\circ YX$ $LiNbO_3$. Фильтры состоят из 10 резонаторов. Результаты расчета методом связанных мод на базе P -матриц и измерений АЧХ фильтра представлены на рис. 13–15. Некоторые расхождения в полосе заграждения объясняются тем, что здесь очень сильно влияют паразитные индуктивности соединительных проводников корпуса, контактных шин и электродов фильтра, а также паразитные емкости преобразователей и корпуса, электромагнитная наводка. Данные вторичные эффекты проанализированы в работах [2, 3]. Результаты анализа основных характеристик измеренных фильтров показаны в таблице.

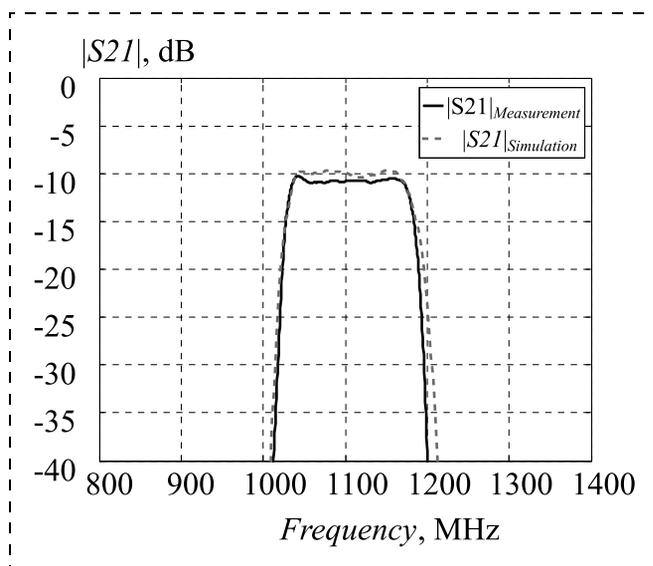


Рис. 15. Расчетная и измеренная АЧХ фильтра № 3

Основные характеристики изготовленных фильтров

Фильтр	Вносимые потери, дБ	Относительная полоса пропускания по уровню -3 дБ, %	Неравномерность в полосе пропускания, дБ	Подавление в полосе заграждения, дБ	Коэффициент прямоугольности по уровням -3/-40
№ 1	-7,4	10,6	0,5	-40	1,46
№ 2	-5,7	8,3	0,6	-35	1,55
№ 3	-10	13,5	0,8	-40	1,45

Заключение

Представленный способ расчета и извлечения необходимых *СОМ*-параметров позволяет моделировать лестничные фильтры с большим числом звеньев на сильных пьезоэлектрических материалах, что дает возможность получать относительные полосы пропускания до 12 %. Разработанные лестничные ПАВ-фильтры имеют небольшие вносимые потери, высокую прямоугольность и избирательность, малые габаритные размеры, но требуют согласования.

Список литературы

1. **Дмитриев В. Ф.** Синтез лестничных фильтров на основе резонаторов на поверхностных акустических волнах // Журнал технической физики. 2002. Т. 72, № 8. С. 95–102.
2. **Орлов В. С.** Лестничные резонаторные фильтры на поверхностных акустических волнах для приемников навигационных систем // Т-Comm: Телекоммуникации и транспорт. 2016. Т. 10, № 5. С. 8–16.
3. **Орлов В. С., Русаков А. Н.** Особенности проектирования лестничных резонаторных фильтров на поверхностных акустических волнах для дуплексерных модулей мобильных систем связи // Т-Comm: Телекоммуникации и транспорт. 2018. Т. 12, № 6. С. 24–33. DOI: 10.24411/2072-8735-2018-10104
4. **Веремеев И. В.** Лестничные фильтры на ПАВ с относительной полосой пропускания 3–4 % // Техника радиосвязи. 2017. № 3 (34). С. 85–94.
5. **Ivanov P. G., Makarov V. M., Orlov V. S., Shvetts V. B.** Wideband low loss SAW filters for telecommunication and mobile radio applications // IEEE Ultrasonics symposium. 1996. P. 61–64.
6. **Morgan D.** Surface Acoustic Wave Filters With Applications to Electronic Communications and Signal Processing. London: Academic Press, 2010. 448 p.
7. **Plessky V. P., Koskela J.** Coupling-of-modes analysis of SAW devices // Int. J. High Speed El. and Syst. Dec. 2000. Vol. 10. 81 p.
8. **Hashimto K.** Surface Acoustic Wave Devices in Telecommunications, Modelling and Simulation. Berlin: Springer, 2000. 321 p.
9. **Дмитриев В. Ф.** Вывод модифицированных уравнений связанных поверхностных акустических волн // Радиотехника и электроника. 2009. Т. 54, № 9. С. 1134–1143.
10. **Malocha S., Gamble K. J., Dong H., Dharmalingam A.** Automated COM parameter extraction for SiO₂/LiNbO₃ and SiO₂/LiTaO₃ substrates // 2016 IEEE International Ultrasonics Symposium (IUS). Tours, 2016. P. 1–4. DOI: 10.1109/ULTSYM.2016.7728387.
11. **Pastureaud T.** Evaluation of the P-matrix parameters frequency variation using periodic FEM/BEM analysis // IEEE Ultrasonics Symposium, 2004, Montreal, Quebec, Canada, 2004. Vol. 1. P. 80–84. DOI: 10.1109/ULTSYM.2004.1417673
12. **Sveshnikov B., Koigerov A., Yankin S.** Unveiling the polarization of the multimode acoustic fields // Ultrasonics. 2018. Vol. 82. P. 209–216. DOI: 10.1016/j.ultras.2017.08.011
13. **Реут В. Р., Койгеров А. С., Андрейчев С. С., Дорохов С. П., Салов А. С.** Новая конструкция многоканальной ПАВ-радиометки на основе многополоскового ответвителя // Нано- и микросистемная техника. 2019. Т. 21, № 10. С. 579–593. DOI: 10.17587/nmst.21.579-593
14. **Yantchev V., Turner P., Plessky V.** COMSOL modeling of SAW resonators // Proc. IEEE Ultrason. Symp., Oct. 2016. P. 1–4. DOI: 10.1109/ULTSYM.2016.7728546
15. **Бальшева О. Л., Григорьевский В. И., Гуляев Ю. В.** и др. Акустоэлектронные устройства обработки и генерации сигналов. Принципы работы, расчета и проектирования. / Под ред. Ю. В. Гуляева. М.: Радиотехника, 2012. 576 с.
16. **Rusakov A.** Modified P-Matrix Model and it's Implementation for Design of SAW Resonator Filters // IEEE Ultrasonics Symposium. 2004. P. 85–89.
17. **Hartmann C., Plessky V.** Experimental Measurements of Propagation, Attenuation, Reflection and Scattering of Leaky Waves in Al Electrode Gratings on 41, 52, and 64-LiNbO₃. IEEE Ultrasonics Symposium. 1993. P. 1247–1250.
18. **Mayer M., Dadgar-Javid G., Ebner T., Wagner K.** Causal P-matrix description of leaky SAW devices // 2016 IEEE International Ultrasonics Symposium (IUS). Tours. 2016. P. 1–4. DOI: 10.1109/ULTSYM.2016.7728407.

A. S. Koigerov, Ph. D., Associate Professor at the Department of Micro- and Nano electronics, a.koigerov@gmail.com, Saint-Petersburg Electrotechnical University "LETI", St. Petersburg, 197376, Russian Federation

Corresponding author:

Koigerov Aleksey S., Ph. D., Associate Professor at the Department of micro- and nano electronics, a.koigerov@gmail.com, Saint Petersburg Electrotechnical University "LETI", Saint-Petersburg, 197376, Russian Federation.

Ladder Type of Leaky Surface Acoustic Waves Filters on Substrate of Lithium Niobate

Received on February 28, 2021

Accepted on March 11, 2021

High requirements on the electrical parameters of the filters are made in wireless radio communication systems. A number of tasks require bandpass filters with relative bandwidths of 8–12 %. In this case, the filter must have insertion losses of not more than 10 dB, have a rejection is not worse than 40 dB, unevenness in the bandwidth of not more than 1 dB.

In addition, the amplitude frequency responses of the filter must have steep slopes due to the closely spaced frequency bands of neighboring communication systems. Due to its small size and other advantages, ladder resonator filters on surface acoustic waves are widely used in communication systems. To realize the high requirements of this type of filters, it is necessary not only to select all the topology parameters of the individual resonators included in the filter very accurately, but also to have a good computational theory and the necessary material parameters for the selected model at the design stage.

Purpose: to show on the example of comparison of calculated and experimental frequency responses of ladder filters the validity of the method of extraction of the necessary parameters obtained for an infinite periodic structure by the finite element method for calculating of finite structures of real inter digital transducer and reflective gratings. **Results:** the method of extraction of parameters necessary for calculation by the method of connected modes on the basis of P-matrices is offered. The technique is based on the analysis of infinite periodic electrodes by the finite element method. Bandpass filters with a relative bandwidth 8–12 % on a piezosubstrate 49° YX LiNbO₃ were designed and manufactured based on the proposed theory. It is shown that for this material, the calculation must take into account the direct radiation of bulk acoustic waves, since the design of ladder type filters, the radiation falls into the projected bandwidth of the filters. These calculations are confirmed by the results of experiments.

Keywords: surface acoustic waves, leaky SAW, resonator, ladder filters, method coupled of mode, finite element method, eigen frequency, bulk acoustic waves, wideband filter, niobate lithium, piezosubstrate

For citation:

Koigerov A. S. Ladder Type of Leaky Surface Acoustic Waves Filters on Substrate of Lithium Niobate, *Nano- i mikrosistemnaya tekhnika*, 2021, vol. 23, no. 3, pp. 139–147.

doi: 10.17587/nmst.23.139-147

References

1. **Dmitriev V. F.** Sintez lestnichnyh fil'trov na osnove rezonatorov na poverhnostnyh akusticheskikh volnah. *Zhurnal tekhnicheskoy fiziki*, 2002, vol. 72, no. 8, pp. 95–102 (in Russian).

2. **Orlov V. S.** The ladder resonator filters on surface acoustic waves for receivers of navigation systems, *T-Comm*, 2016, vol. 10, no. 5, pp. 8–16 (in Russian).

3. **Orlov V. S., Rusakov A. N.** Design features of ladder resonator filters on surface acoustic waves for duplexer modules of mobile communication systems. *T-Comm*, 2018, vol. 12, no. 6, pp. 24–33 (in Russian).

4. **Veremeev I. V.** Ladder-type saw filters with fractional bandwidth of 3–4 %. *Radio Communication Technology*, 2017, is. 3 (34), pp. 85–94 (in Russian).

5. **Ivanov P. G., Makarov V. M., Orlov V. S., Shvetts V. B.** Wideband low loss SAW filters for telecommunication and mobile radio applications, 1996, *IEEE Ultrasonics symposium*, pp. 61–64.

6. **Morgan D.** Surface Acoustic Wave Filters With Applications to Electronic Communications and Signal Processing. London, Academic Press, 2010, 448 p.

7. **Plessky V. P., Koskela J.** Coupling-of-modes analysis of SAW devices, *Int. J. High Speed El. and Syst.*, Dec. 2000, vol. 10, 81 p.

8. **Hashimoto K.** Surface Acoustic Wave Devices in Telecommunications, Modelling and Simulation. Berlin, Springer, 2000, 321 p.

9. **Dmitriev V. F.** Modified equations of coupled surface acoustic waves. *Journal of Communications Technology and Electronics*, 2009, vol. 54, no. 9, pp. 1077–1086.

10. **Malocha S., Gamble K. J., Dong H., Dharmalingam A.** Automated COM parameter extraction for SiO₂/LiNbO₃ and SiO₂/LiTaO₃ substrates, 2016 *IEEE International Ul-*

trasonics Symposium (IUS), Tours, 2016, pp. 1–4, doi: 10.1109/ULTSYM.2016.7728387.

11. **Pastureaud T.** Evaluation of the P-matrix parameters frequency variation using periodic FEM/BEM analysis, *IEEE Ultrasonics Symposium, 2004*, Montreal, Quebec, Canada, 2004, vol. 1, pp. 80–84, doi: 10.1109/ULTSYM.2004.1417673

12. **Sveshnikov B., Koigerov A., Yankin S.** Unveiling the polarization of the multimode acoustic fields, *Ultrasonics*, 2018, vol. 82, pp. 209–216, doi: 10.1016/j.ultras.2017.08.011

13. **Reut V. R., Koigerov A. S., Andreychev S. S., Dorokhov S. P., Salov A. S.** The New Design of SAW ID Tags on Base of Multistrip Coupler, *Nano- i mikrosistemnaya tekhnika*, 2019, vol. 21, no. 10, pp. 579–593, doi: 10.17587/nmst.21.579-593

14. **Yantchev V., Turner P., Plessky V.** COMSOL modeling of SAW resonators, *Proc. IEEE Ultrason. Symp.*, oct. 2016, pp. 1–4, doi: 10.1109/ULTSYM.2016.7728546

15. **Balysheva O. L., Grigoryev V. I., Gulyaev Ju. V.** et al. Akustoelektronnye ustrojstva obrabotki i generacii signalov. Principy raboty, rascheta i proektirovaniya / Ed. akad. RAN Ju. V. Guljaeva. Moscow, Radiotekhnika, 2012, 576 p. (in Russian).

16. **Rusakov A.** Modified P-Matrix Model and it's Implementation for Design of SAW Resonator Filters, *IEEE Ultrasonics Symposium*, 2004, pp. 85–89.

17. **Hartmann C., Plessky V.** Experimental Measurements of Propagation, Attenuation, Reflection and Scattering of Leaky Waves in Al Electrode Gratings on 41, 52, and 64-LiNbO₃, *IEEE Ultrasonics Symposium*, 1993, pp. 1247–1250.

18. **Mayer M., Dadgar-Javid G., Ebner T., Wagner K.** Causal P-matrix description of leaky SAW devices, 2016 *IEEE International Ultrasonics Symposium (IUS)*, Tours, 2016, pp. 1–4, doi: 10.1109/ULTSYM.2016.7728407.

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

УДК 539.23-022.53

DOI: 10.17587/nmst.23.148-152

П. А. Александров, д-р физ.-мат. наук, директор Института информационных технологий,
Е. К. Баранова, канд. физ.-мат. наук, ст. науч. сотр.,
В. В. Бударагин, канд. физ.-мат. наук, ст. науч. сотр., e-mail: lbudaragin@gmail.ru,
В. Л. Литвинов, д-р физ.-мат. наук, вед. науч. сотр.
НИЦ "Курчатовский институт", Москва, e-mail: alexandrov_pa@nrcki.ru

РАЗМЕРНЫЙ ЭФФЕКТ В КРЕМНИИ, ОБЛУЧЕННОМ СОБСТВЕННЫМИ ИОНАМИ

Поступила в редакцию 19.02.2021

Рассмотрено влияние толщины образца кремния, облученного ионами кремния на пространственное распределение первичных структурных дефектов, фононов и наведенных зарядов. Расчеты проводили с помощью программы SRIM 2013. Полученные результаты могут быть использованы при анализе взаимодействия других видов излучения с пластинами кремния, в частности с нейтронами.

Ключевые слова: облучение, тонкие пленки, размерный эффект

Введение

Подавляющее число микроэлектронных компонентов (микросхем) создано на основе кристалла кремния. Устойчивость микросхем, изготовленных на кремнии и других полупроводниковых материалах, к радиационным воздействиям остается до сих пор не решенной полностью проблемой. Значительная часть вопросов снимается с помощью технологических методов, используемых при изготовлении микросхемы. Однако в ряде случаев, когда одна частица может вызвать отказ всей микросхемы, ситуация сильно усложняется. Это происходит, когда на схему воздействуют тяжелые заряженные частицы (ТЗЧ) в космосе или быстрые нейтроны от космических источников и специальных ядерных энергетических установок. В обоих случаях это частицы с большой длиной пробега и полная защита от их воздействия не реальна, а само воздействие носит вероятностный характер. Таким

образом, технологическими методами можно существенно уменьшить воздействие на микросхему таких частиц, как гамма-кванты, медленные нейтроны, электроны. При взаимодействии частиц высокой энергии с материалом микросхемы происходит генерация ионов кремния различных энергий, которые и воздействуют на транзисторы и межсоединения, создавая повышенную концентрацию носителей заряда и структурные дефекты [1].

Размерный эффект (РЭ) — комплекс явлений, связанных с изменениями физико-химических свойств вещества вследствие: 1) непосредственного изменения размеров образца; 2) вклада границ раздела в свойства системы; 3) соизмеримости размеров образца с различными физическими параметрами, имеющими размерность длины (длина свободного пробега носителей, длина де Бройля и т. д.) [2]. Большое число различных размерных эффектов во многих мате-

риалах изучали ранее [3]. В настоящее время актуальность их исследования увеличилась в связи с широким применением тонких пленок и масштабированием полупроводниковых приборов [4]. В данном случае такими физическими величинами являются структурные дефекты (междоузлия, вакансии, фононы) и наведенные облучением заряды. Рассмотрение этого вопроса позволяет моделировать процессы радиационных повреждений в полупроводниковых материалах, приборах и интегральных схемах. Информация о влиянии размерных эффектов в полупроводниках при облучении в настоящее время ограничена.

Целью данной работы является изучение качественных эффектов — изменение распределений структурных дефектов, зарядов и получение количественных оценок указанных свойств (структурных дефектов и наведенных зарядов) при облучении кремниевых пластин собственными ионами.

Условия проведения расчетов

При облучении кремниевой мишени нейтронами спектра деления создаются ионы кремния со средней энергией до 2 МэВ. Эти ионы кремния в свою очередь образуют структурные нарушения и ионизацию в образце кремния.

Для основных расчетов нами были выбраны ионы кремния с энергией до 2 МэВ; число ионов составляло 10^3 , при нормальном падении. Расчеты проводили с использованием программы SRIM-2013 [5]. Анализировали следующие параметры: энергия, пошедшая на ядерные взаимодействия падающих ионов с решеткой кремния $(dE/dx)_n$ и

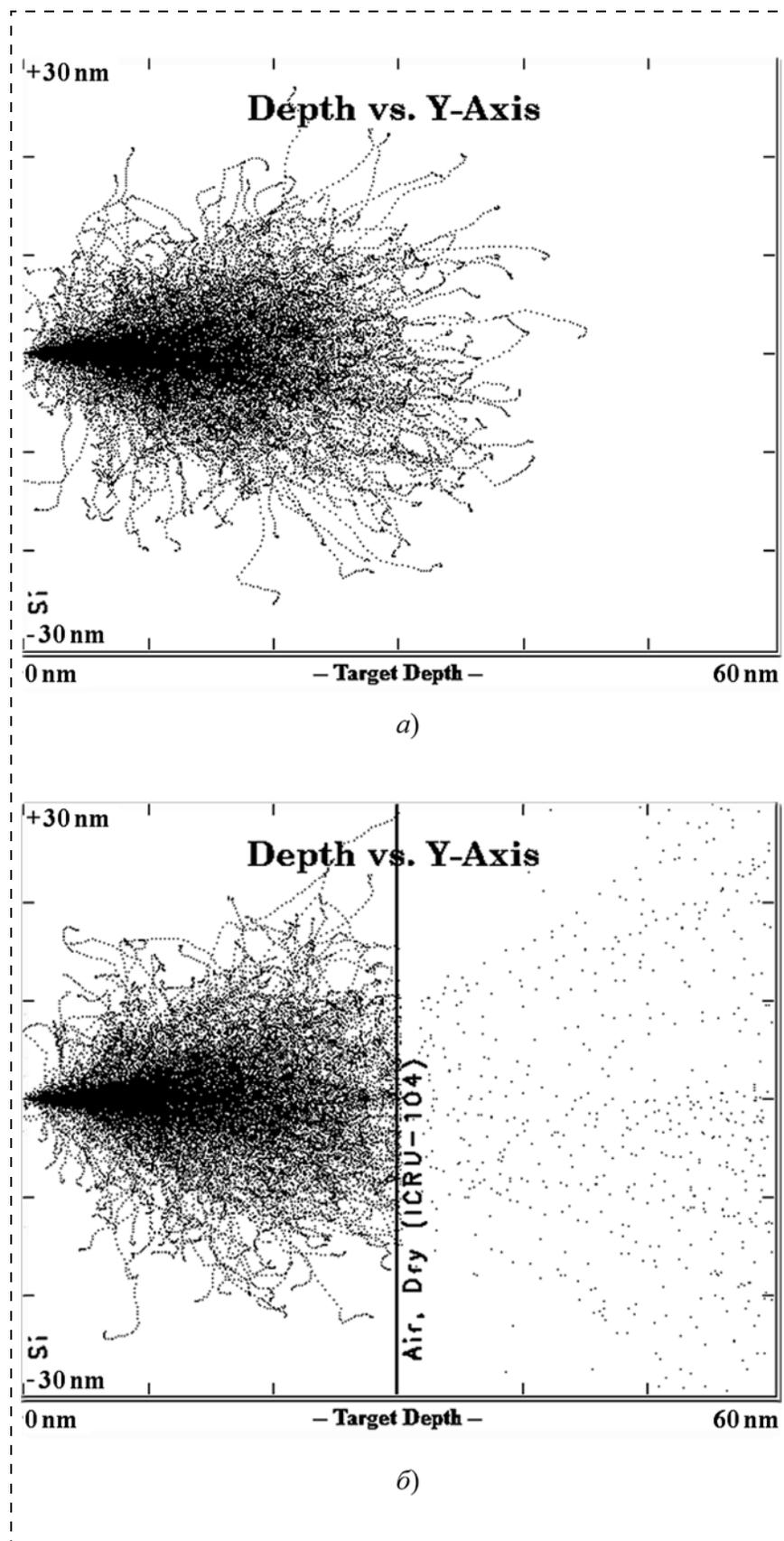


Рис. 1. Пространственное распределение каскада смещений при облучении кремния собственными ионами с энергией 10 кэВ: *a* — в объемном образце до глубины 60 нм; *б* — в тонком слое толщиной 30 нм. (Расчет TRIM [5])

электронные потери — создание электронно-дырочных пар (dE/dx)_e; их пространственное распределение и вклады в общие энергетические потери. Оценку числа смещенных атомов проводили при энергии смещения атома из узла 12 эВ и энергии образования пары 3,6 эВ. Размеры образцов варьировали в диапазоне от 1 мкм до 10 нм, что соответствует размерам приборов и интегральных схем в современной микроэлектронике.

Основные полученные результаты и их обсуждение

На рис. 1, а и б показано изменение каскадов столкновений при облучении пластин кремния толщиной 60 и 30 нм, при энергии ионов кремния 10 кэВ. Траектории заполняют область вдоль направления падения иона на поверхность образца. С увеличением числа падающих ионов плотность заполнения области увеличивается. Траектории состоят из прямолинейных участков, длина которых уменьшается при снижении энергии иона в образце. Точки излома соответствуют ядерным взаимодействиям, вдоль каждого участка происходят непрерывные электронные взаимодействия. Отклонения отдельных участков носят вероятностный характер.

Также были рассчитаны функции распределения траекторий при увеличении числа ионов на два порядка, а также их зависимости от угла падения от 0 до 89° к поверхности. Их качественный характер при изменении указанных параметров сохранялся.

На рис. 2, а и б представлены значения потерь энергии ионов кремния, падающих на пластинки кремния толщинами 0,1 мкм (2, а) и 10 нм (2, б), расходуемые на процессы ионизации (кривые 1), образование структурных дефектов (кривые 2) и фононов (кривые 3) в диапазоне энергий падающих ионов от 10 до 10⁴ кэВ. Характер зависимостей сохраняется для данных толщин, а именно: с ростом энергии падающих ионов кремния ионизационные потери увеличиваются, структурные нарушения (образование вакансий) остаются постоянными, а образование фононов уменьшается.

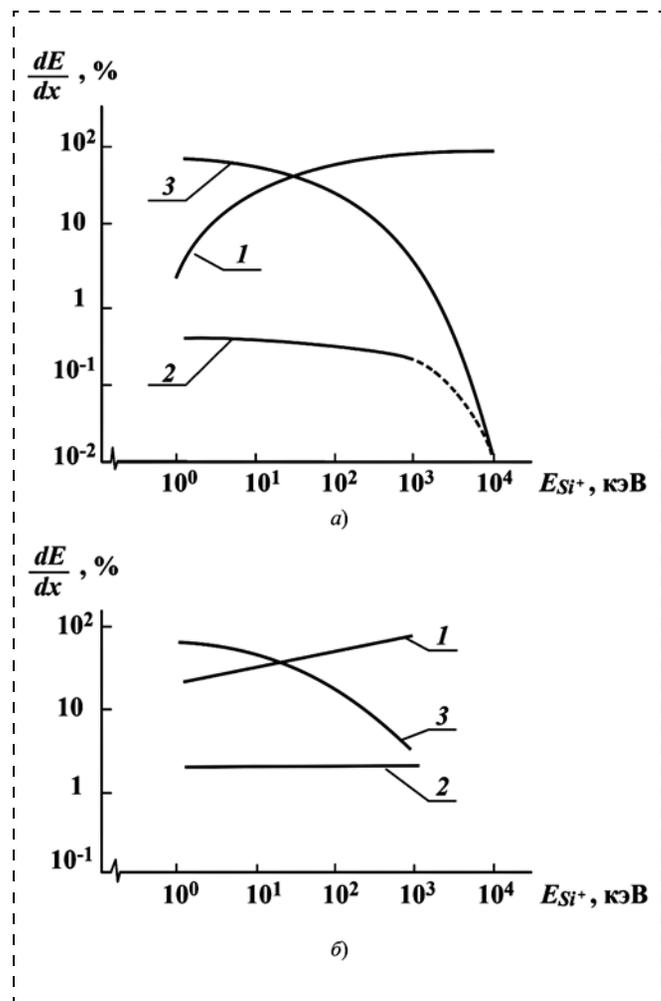


Рис. 2. Доля энергетических потерь ионов Si⁺ в Si на процессы ионизации (1), образование вакансий (2), образование фононов (3) для образцов толщиной 100 нм (а) и 10 нм (б). Число ионов кремния — 10³, угол падения $\alpha = 0^\circ$

Падающие на мишень собственные ионы создают электронно-дырочные пары. Число таких пар определяется энергией падающих ионов. Число пар при различных энергиях падающих ионов приведено в таблице.

На рис. 3 приведено распределение наведенных зарядов по глубине в образце кремния, толщиной 0,1 мкм. Результаты расчетов, представленные на рис. 3, показывают, что протяженность областей, в которых образуются заряды, растет с увеличением энергии ионов. Начиная с энергии 2 · 10³ кэВ, пары равномерно распреде-

Число электронно-дырочных пар в кремнии в зависимости от энергии собственных ионов

Энергия ионов кремния, кэВ	10 ⁴	4 · 10 ³	2 · 10 ³	10 ³	10 ²	10	1
Число пар	8,3 · 10 ⁴	6,4 · 10 ⁴	4,3 · 10 ⁴	3,0 · 10 ⁴	8,9 · 10 ²	8,3 · 10 ²	1,33 · 10 ²

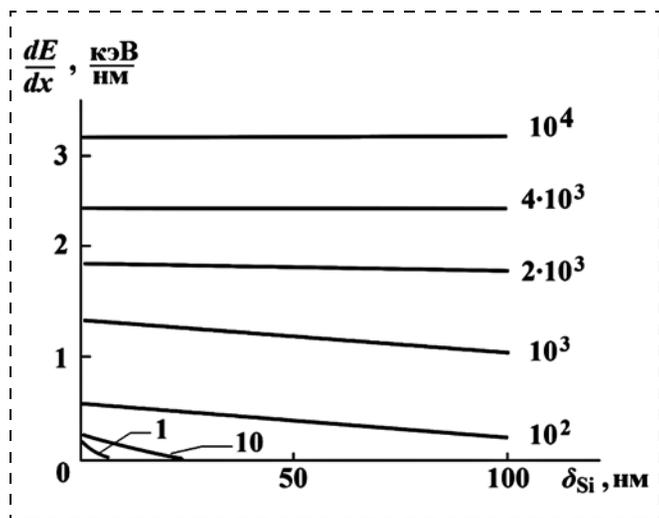


Рис. 3. Сглаженное пространственное распределение ионизационных потерь в образце Si толщиной 100 нм (числа около кривых соответствуют значениям энергии ионов Si^+ в кэВ)

ляются по образцу, затем их концентрация увеличивается.

При исследовании радиационных повреждений важно определить, на какие процессы расходуется энергия падающих ионов. На рис. 2 показана доля энергии ионов, пошедшая на создание смещений, наведенных зарядов и фононов. Вклады этих процессов зависят от толщины образца и энергии облучающего иона. При этом для малых энергий преобладают потери на образование фононов, а для больших энергий — потери на ионизацию.

Основной характеристикой размерного эффекта в полупроводниках является его характерная длина [4]. Значение этой длины зависит от исследуемого физического параметра.

Для гальвано-магнитных свойств такими параметрами являются: длина свободного пробега носителей, длина экранирования Дебая; длина диффузии и т. д. В нашем случае такой характерной длиной является

$$L = R_p + (2...3)\Delta R_p,$$

где величины R_p и ΔR_p — средний проецированный пробег и его разброс, соответственно, которые определяются энергией падающих ионов кремния.

Материал, из которого изготавливают современные микросхемы, характеризуется уровнем исходного легирования, или иначе концентрацией носителей заряда при рабочей температуре. Внешнее облучение с генерацией ионов крем-

ния приводит к появлению дополнительных носителей заряда на короткое время, далее вступают такие процессы, как рекомбинация, диффузия и др. [6, 7], которые здесь рассматривать не будем.

Соотношение между исходной концентрацией носителей и введенной в результате облучения в объем, характеризующийся длиной пробега ионов кремния, и будет определять работоспособность приборов. Например, при большом числе вводимых носителей возникнет короткое замыкание.

Отсюда вытекает сразу несколько простых рекомендаций по созданию микросхем с повышенной радиационной стойкостью. Это повышение уровня исходного легирования, увеличение энергии образования пары носителей и увеличение энергии, необходимой для смещения атома из положения равновесия.

Заключение

Основные результаты работы сводятся к следующему.

Расчетно-теоретическим путем показана зависимость образования структурных дефектов решетки, фононов и ионизационных зарядов на стадии первичных процессов. Результаты проанализированы с точки зрения классического размерного эффекта.

Оценены вклады этих процессов в энергетические потери ионов кремния при облучении кремниевых пластин.

Приведено выражение для характерной длины L , определяющей проявление размерного эффекта при облучении.

Результаты работы могут быть использованы при изучении действия излучения на кремниевые полупроводниковые приборы и приборы, изготовленные на других полупроводниковых материалах [4].

Работа выполнена при поддержке НИЦ "Курчатовский институт". Приказ № 116 от 30.01.2018.

Список литературы

1. **Spieler H.** Introduction to Radiation-Resistant Semiconductor Devices and Circuits // AIP Conference Proceedings. 1997. V. 390, N 1. P. 1—31.
2. **Физический** Энциклопедический Словарь / Под ред. А. М. Прохорова. М.: Советская Энциклопедия, 1984. 984 с.

3. **Кравченко А. Ф., Митин В. В., Скок Э. М.** Явления переноса в полупроводниковых пленках. Новосибирск: Наука, 1979. 255 с.

4. **Зеврев Г. И.** Физические основы кремниевой наноэлектроники. М.: Бином, 2011. 240 с.

5. **Ziegler J. F.** SRIM and TRIM. 2013. URL: <http://www.srim.org>

6. **Александров П. А., Баранова Е. К., Баранова И. В., Бударагин В. В., Литвинов В. Л., Свечников А. Б.** От-

личие воздействия излучений на наноэлектронные материалы, приборы, схемы и на их микроэлектронные аналоги // *Нано- и микросистемная техника*. 2012. № 4. С. 2—11.

7. **Александров П. А., Бударагин В. В., Жук В. И., Литвинов В. Л.** Об отказоустойчивости наноэлектронных интегральных схем при облучении // *Нано- и микросистемная техника*. 2014. № 1. С. 7—14.

P. A. Aleksandrov, D. Sc., Director of Institute of Information Technologies,
National Research Center Kurchatov Institute,

E. K. Baranova, Ph. D., Senior Researcher,

V. V. Budaragin, Ph. D., Senior Researcher, vbudaragin@gmail.com;

V. L. Litvinov, D. Sc., Leading Researcher,

Institute of Information Technologies, National Research Center Kurchatov Institute, Moscow,
123182, Russian Federation

Corresponding author:

Budaragin Vladimir V., Ph. D., Senior Researcher, Institute of Information Technologies, National Research Center Kurchatov Institute, Moscow, 123182, Russian Federation

E-mail: vbudaragin@gmail.com

Size Effect in Silicon Irradiated with Self Ions

Received on February 19, 2021

Accepted on March 09, 2021

The influence of the thickness of a silicon sample irradiated by silicon ions on the spatial distribution of primary structural defects, phonons, and induced charges is considered. The calculations were performed using the SRIM 2013 program. The results can be used to analyze the interaction of other types of radiation with silicon wafers, in particular with neutrons.

Keywords: irradiation, thin films, size effect

For citation:

Aleksandrov P. A., Baranova E. K., Budaragin V. V., Litvinov V. L. Size Effect in Silicon Irradiated with Self Ions, *Nano- i mikrosistemnaya tekhnika*, 2021, Vol. 23, no. 3, pp. 148—152.

DOI: [10.17587/nmst.23.148-152](https://doi.org/10.17587/nmst.23.148-152)

References

1. **Spieler H.** Introduction to Radiation-Resistant Semiconductor Devices and Circuits // AIP Conference Proceedings 1997, vol. 390, no. 1, pp. 1—31.

2. **Fizicheskii Encyklopedicheskii Slovar'** / Ed. A. M. Prokhorov. Moscow, Sovetskaya Encyklopediya, 1984. 984 p.

3. **Kravchenko A. F., Mitin V. V., Skok E. M.** Yavleniya perenosa v poluprovodnikovyykh pl'onkakh. Novosibirsk, Nauka, 1979. 255 p.

4. **Zebrev G. I.** Fizicheskiye osnovy kremnyevoy nаноэлектроники. Moscow, Binom, 2011. 240 p.

5. **Ziegler J. F.** SRIM and TRIM. 2013. URL: <http://www.srim.org>

6. **Aleksandrov P. A., Baranova E. K., Baranova I. V., Budaragin V. V., Litvinov V. L., Svechnikov A. B.** Otlivchie vozdeystviya izlucheniya na nаноэлектронnye materialy, pribory, skhemy i na ih mikroэлектронnye analogi, *Nano- i mikrosistemnaya tekhnika*, 2012, no. 4, pp. 2—11 (in Russian).

7. **Aleksandrov P. A., Budaragin V. V., Zhuk V. I., Litvinov V. L.** Ob otkazoustojchivosti nаноэлектронnykh integral'nykh skhem pri obluchenii, *Nano- i mikrosistemnaya tekhnika*, 2014, no. 1, pp. 7—14 (in Russian).

А. В. Михеев, технический директор, am@mp-lab.ru;
С. А. Анчутин, вед. инженер, step305@mail.ru;
Е. С. Кочурина, канд. техн. наук, гл. метролог, ekochurina@mp-lab.ru;
А. С. Тимошенко, д-р техн. наук, ген. директор, at@mp-lab.ru
Общество с ограниченной ответственностью "Лаборатория Микроприборов", г. Москва, Зеленоград

ПРИМЕНЕНИЕ ВАРИАЦИИ АЛЛАНА ДЛЯ ОЦЕНКИ СЛУЧАЙНЫХ ПОГРЕШНОСТЕЙ ДАТЧИКОВ УГЛОВОЙ СКОРОСТИ

Поступила в редакцию 10.03.2021

Рассматривается использование вариации Аллана для оценки случайных погрешностей датчиков угловой скорости. Приведены результаты исследований изделий: построены диаграммы и рассчитаны численные значения погрешностей.

Ключевые слова: случайные погрешности, датчик угловой скорости, вариация Аллана

Введение

Случайные погрешности оказывают существенное влияние на достоверность измеряемой угловой скорости. Широкое применение получило использование вариации Аллана для оценки случайных погрешностей, практические рекомендации содержатся в стандартах Института инженеров электротехники и электроники (IEEE), например, для волоконно-оптических гироскопов [1–3].

В данной работе рассматривается применение вариации Аллана для оценки случайных погрешностей МЭМС-датчиков угловой скорости МЭМС-ДУС серии ТГ и МЭМС-ДУС, входящих в состав геодезического инерциального модуля. Датчики разработаны в ООО "Лаборатория Микроприборов".

Виды погрешностей ДУС и их оценки

Все датчики, в том числе и датчики угловой скорости, характеризуются погрешностями, которые можно разделить на систематические и случайные. *Систематическая погрешность* — составляющая погрешности измерения, которая является постоянной или закономерно изменяющейся при повторных измерениях угловой скорости. Значение систематической погрешности одинаково во всех измерениях, проводимых одним и тем же методом с помощью одних и тех же измерительных приборов.

В *микромеханике* одним из примеров *систематической составляющей* погрешности является технологическая погрешность изготовления. Погрешность изготовления сказывается на статическом и динамическом небалансе подвеса дат-

чика угловой скорости (ДУС): разброс частот от чувствительного элемента (ЧЭ) к ЧЭ в составе пластины, погрешности сборки ЧЭ приводят к неоднородности магнитного поля, погрешностям от перекрестных угловых и линейных ускорений основания. К систематическим погрешностям ДУС можно отнести, например, масштабный коэффициент, смещение нуля, коэффициент нелинейности и др.

Случайная погрешность — составляющая погрешности измерения, значение которой различно при повторных измерениях угловой скорости. Эта погрешность обусловлена большим числом факторов, воздействие которых вычислить точно довольно сложно, они вызваны неочевидными источниками и требуют длительного времени для выяснения причины их возникновения. Для оценки случайных погрешностей широко используют вариацию Аллана, позволяющую определить источник ошибки и значение ее вклада [1, 2].

Берем T значений выходного сигнала, записанных с частотой f_s значений в секунду. Далее из набора точек T формируем $L = T/M$ кластеров, здесь M — количество значений на кластер [4].

$$\underbrace{\omega_1, \omega_2, \dots, \omega_M}_{l=1}, \underbrace{\omega_{M+1}, \dots, \omega_{2M}}_{l=2}, \dots, \underbrace{\omega_{T-M}, \dots, \omega_T}_{l=L}.$$

Рассчитываем среднее значение для каждого кластера [4]:

$$\bar{\omega}_L(M) = \frac{1}{M} \sum_{i=1}^M \omega_{(l-1)M+i} \quad l = 1, \dots, L. \quad (1)$$

Далее рассчитываем вариацию Аллана из средних значений кластера [4]:

$$\begin{aligned} \sigma_A^2(\tau_M) &= \frac{1}{2} \langle (\bar{\omega}_{l+1}(M) - \bar{\omega}_l(M))^2 \rangle = \\ &= \frac{1}{2(L-1)} \sum_{l=1}^{L-1} (\bar{\omega}_{l+1}(M) - \bar{\omega}_l(M))^2, \end{aligned} \quad (2)$$

где $\langle \rangle$ — обозначает среднее и $\tau_M = \frac{M}{f_s}$ — указанное время корреляции. Выражение (2) рассчитывается по среднему значению. Для двух

заданных средних значений кластера вариацию Аллана можно записать в виде:

$$\begin{aligned} \sigma^2 &= (\bar{\omega}_1 - AVG)^2 + (\bar{\omega}_2 - AVG)^2 = \\ &= \frac{1}{2} (\bar{\omega}_2 - \bar{\omega}_1)^2, \end{aligned}$$

где $AVG = \frac{1}{2} (\bar{\omega}_1 + \bar{\omega}_2)/2$ — среднее значение для двух выборок.

Выбирая длину кластера (время корреляции), можно построить зависимость вариации Аллана от времени корреляции. Этот метод на логарифмическом графике (квадратный корень из вариации Аллана в зависимости от времени корреляции) позволяет выделить вклады различных погрешностей путем анализа наклонов участков кривой на графике. По графику можно определить коэффициент шума квантования (Q), случайное угловое блуждание (N), нестабильность смещения нуля (B), случайное блуждание угловой скорости (K), тренд (R) и гармоническую помеху (частота f_0 и амплитуда Ω_0 гармонической помехи). Точность оценки дисперсии Аллана зависит от числа независимых кластеров в наборе данных. Погрешность оценки вариации Аллана увеличивается с уменьшением числа незави-

симых кластеров в наборе: $\% error = \frac{100}{\sqrt{2(K-1)}} [4];$

$$\begin{aligned} \sigma_A^2(\tau_M) &\approx \frac{3Q^2}{\tau^2} + \frac{N^2}{\tau} + \frac{2B^2}{\pi} \ln 2 + K^2 \frac{\tau}{3} + \\ &+ \frac{R^2 \tau^2}{2} + \Omega_0^2 \left(\frac{\sin^2(\pi f_0 \tau)}{\pi f_0 \tau} \right). \end{aligned} \quad (3)$$

Численные значения коэффициентов Q, N, B, K, R, f_0 и Ω_0 полинома (3) можно определить методом наименьших квадратов. Каждому типу случайной погрешности будет соответствовать специфический наклон на диаграмме Аллана. Диаграмма Аллана — график зависимости корня квадратного из вариации Аллана от времени корреляции, построенный в логарифмическом масштабе.

На основе экспериментальных исследований МЭМС-ДУС было выявлено, что наиболее существенный вклад вносят такие погрешности, как случайное угловое блуждание и нестабильность смещения нуля.

Случайное угловое блуждание (*angle random walk*) — это высокочастотный шум, который можно наблюдать как кратковременное изменение выходного сигнала. Случайное угловое блуждание характеризует белый шум МЭМС-ДУС, источником которого является и механическая и электронная части датчика. После интегрирования этот шум вызывает случайную ошибку в угле с распределением, которое пропорционально квадратному корню из времени корреляции. Наклон на диаграмме Аллана для данной погрешности равен $-0,5$ (рис. 1).

Из спектральных свойств белого шума и связи спектральной плотности шума и вариации Аллана известно [1]: $\log(\sigma_{ARW}) = -0,5\log(\tau) + \log(N)$ или

$$\sigma_{ARW}(\tau) = \frac{N}{\sqrt{\tau}} \quad (4)$$

$$\text{При } \tau = 1 \text{ с, } \log(1) = 0 \Rightarrow \sigma_{ARW} [^\circ/\text{ч}] = \frac{N [^\circ/\text{ч}]}{\sqrt{(1 \text{ с})}} = \frac{N [^\circ/\text{ч}]}{\sqrt{\left(\frac{1}{3600} \text{ ч}\right)}}$$

$$\Rightarrow \sigma_{ARW} [^\circ/\text{ч}] = \frac{N [^\circ/\text{ч}]}{\sqrt{\text{ч}}} \frac{60}{\sqrt{\text{ч}}} \sigma_{ARW} [^\circ/\text{ч}] \text{ — значение}$$

составляющей графика с наклоном $-0,5$ из диаграммы Аллана при $\tau = 1$ с. То есть на графике (на диаграмме Аллана) нужно найти график с наклоном $-0,5$ (это белый шум). Продлеваем линию до пересечения с прямой $\tau = 1$ с. Смотрим значение вариации Аллана $\sigma_{ARW} [^\circ/\text{ч}]$ в точке пересечения. Делим на 60 — это и есть N — случайное угловое блуждание (*angle random walk*).

Нестабильность смещения нуля (bias instability) — медленное изменение выходного сигнала. Нестабильность нулевого сигнала вызвана преимущественно шумами в электронном блоке обработки сигнала ДУС, влияние механической части в меньшей степени. Этот тип шума также называют фликкер-шумом (розовый НЧ шум) или шумом $1/f$. Такой тип шума проявляется

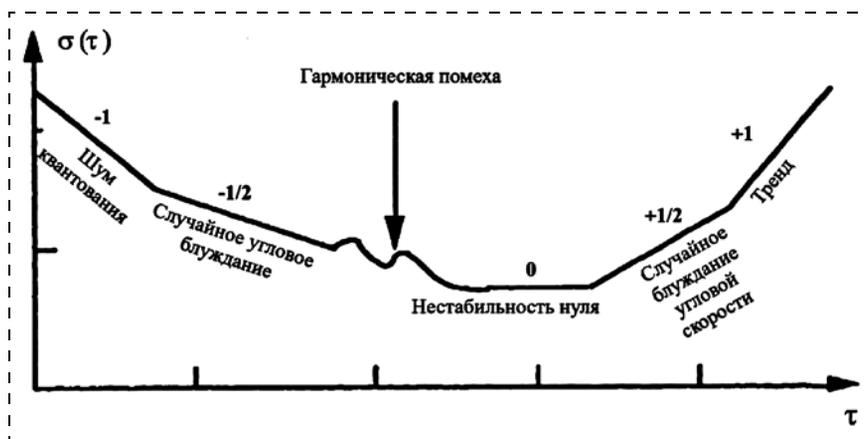


Рис. 1. Типовая диаграмма Аллана для ДУС [4]



Рис. 2. Диаграмма Аллана

практически у всех компонентов электронной техники (особенно у операционных усилителей, применяемых для усиления сигнала с чувствительного элемента ДУС). Эта шумовая составляющая обычно оказывает значительное влияние на низких частотах (связано с высоким значением коэффициента усиления в предварительных усилителях ДУС). Наклон на диаграмме Аллана для данной погрешности равен 0 (см. рис. 1). Вариация Аллана для нестабильности смещения нуля [1]:

$$\sigma_{BIAS}(\tau) = \sqrt{\frac{2\ln 2}{\pi}} B \quad (5)$$

Типовая диаграмма Аллана МДУС, входящего в состав геодезического инерциального модуля МГ-25 (производства ООО "Лаборатория Микроприборов"), показана на рис. 2.

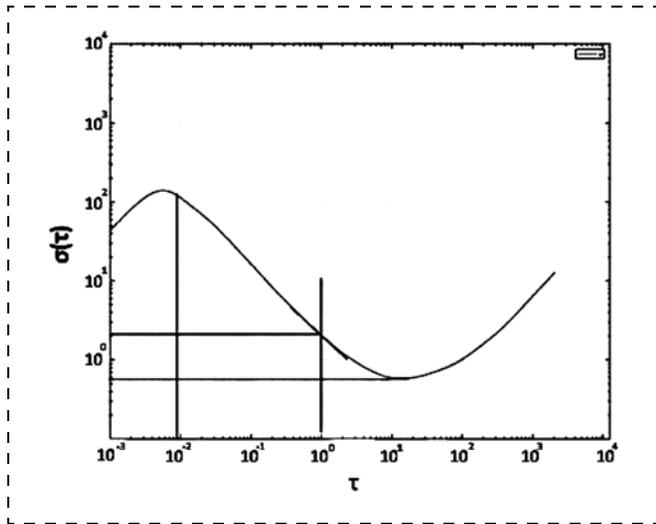


Рис. 3. Диаграмма Аллана для МЭМС-ДУС ТГ-100

По диаграмме можно определить σ_{ARW} , в данном случае $\sigma_{ARW} = 1,6 \text{ }^\circ/\text{ч}$ (определяем по пересечению графика линии $\tau = 1 \text{ с}$). С помощью формулы (4) можно рассчитать $N = 0,0035 \text{ }^\circ/\sqrt{\text{ч}}$.

Нестабильность смещения нуля в запуске $\sigma_{BIAS} = 0,12 \text{ }^\circ/\text{ч}$ (определяем по минимальному значению графика). С учетом формулы (5) определяем $B = 0,18 \text{ }^\circ/\text{ч}$.

Типовая диаграмма Аллана для МЭМС-ДУС ТГ-100 (производства ООО "Лаборатория Микроприборов") приведена на рис. 3.

По диаграмме можно определить σ_{ARW} , в данном случае $\sigma_{ARW} = 1,1 \text{ }^\circ/\text{ч}$ определяем по пересечению графика линии $\tau = 1 \text{ с}$). С помощью формулы (4) можно рассчитать: $N = 0,055 \text{ }^\circ/\sqrt{\text{ч}}$. Нестабильность смещения нуля в запуске $\sigma_{BIAS} = 0,58 \text{ }^\circ/\text{ч}$ (определяем по минимальному значению графика). С учетом формулы (5) определяем $B = 0,88 \text{ }^\circ/\text{ч}$.

По диаграмме Аллана (по перегибу графика в области малых значений τ) также можно оценить полосу пропускания датчика. Связано это с тем, что для идеального датчика и белого шума

при уменьшении τ должно неограниченно возрастать значение σ . На практике полоса пропускания датчиков ограничена, белым шум можно представлять только в этой ограниченной полосе. И на диаграмме Аллана в момент времени τ , равном постоянной времени датчика, будет присутствовать перегиб (локальный экстремум) — полоса наблюдаемого спектра растет, шум при этом не увеличивается, происходит уменьшение спектральной плотности, а значит, и вариации Аллана. Полоса пропускания для двух датчиков, упомянутых в данной работе, составляет порядка 100 Гц (постоянная времени 10 мс, $\tau = 0,01 \text{ с}$).

Заключение

Вариация Аллана позволяет оценить случайные погрешности (случайное угловое блуждание, случайный дрейф нулевого сигнала) датчика угловой скорости. В работе приведены результаты исследований двух изделий производства ООО "Лаборатория Микроприборов": построены диаграммы и рассчитаны численные значения погрешностей. Показан способ косвенной оценки полосы пропускания датчика на основе диаграммы Аллана.

Список литературы

1. IEEE Std 1554—2005. IEEE Recommended Practice for Inertial Sensor Test Equipment, Instrumentation, Data Acquisition, and Analysis.
2. IEEE Std 952—1997. IEEE Standard Specification Format Guide and Test Procedure for Single-Axis Interferometric Fiber Optic Gyros.
3. Кутовой Д. А., Ситников П. В. Некоторые практические вопросы использования вариации Аллана при исследовании бесплатформенного инерциального блока // Навигация и управление движением. Материалы XV конференции молодых ученых. СПб.: ЦНИИ "Электроприбор", 2013. С. 246—252.
4. Lawrence C. Ng. On the Application of Allan Variance Method for Ring Laser Gyro Performance Characterization. USA: Lawrence Livermore National Laboratory, 1993, 25 p.

A. V. Miheev, Technical Director, am@mp-lab.ru;
 S. A. Anchutin, Leading Engineer, step305@mail.ru;
 E. S. Kochurina, Chief Metrologist, ekochurina@mp-lab.ru;
 A. S. Timoshenkov, General Director, at@mp-lab.ru
 LMD Ltd., Zelenograd, Moscow, 124527, Russian Federation

Corresponding author:

Kochurina Elena S., Chief Metrologist, LMD Ltd., Zelenograd, Moscow, 124527, Russian Federation
 E-mail: ekochurina@mp-lab.ru,

The Use of Allan Variation in the Study of the Random Errors of Angular Rate Sensors

Received on March, 10, 2021

Accepted on April, 01, 2021

This paper describes the use of Allan variation in the study of the random errors of angular rate sensors. The results of the study are presented: Allan diagram, Angle Random Walk, Bias Instability.

Keywords: random errors, angular rate sensors, Allan variance

For citation:

Mihev A. V., Anchutin S. A., Kochurina E. S., Timoshenkov A. S. The Use of Allan Variation in the Study of the Random Errors of Angular Rate Sensors, *Nano- i mikrosistemnaya tekhnika*, 2021, vol. 23, no. 3, pp. 153–157.

DOI: 10.17587/nmst.23.153-157

References

1. **IEEE Std 1554—2005.** IEEE Recommended Practice for Inertial Sensor Test Equipment, Instrumentation, Data Acquisition, and Analysis.

2. **IEEE Std 952—1997.** IEEE Standard Specification Format Guide and Test Procedure for Single-Axis Interferometric Fiber Optic Gyros.

3. **Kutovoj D. A., Sitnikov P. V.** Nekotorye prakticheskie voprosy ispol'zovaniya variacii Allana pri issledovanii besplatformennogo inercial'nogo bloka, *Navigacija i upravlenie dvizheniem. Materialy XV konferencii molodyh uchenyh.* SPb.: CNII "Jelektropribor", 2013, pp. 246—252.

4. **Lawrence C. Ng.** On The Application of Allan Variance Method for Ring Laser Gyro Performance Characterization. USA: Lawrence Livermore National Laboratory, 1993, 25 p.

УДК 621.362

DOI: 10.17587/nmst.23.157-161

Д. Г. Мустафаева, канд. техн. наук, доц., dzhamilya79@yandex.ru
ФГБОУ ВО "Северо-Кавказский горно-металлургический институт
(Государственный технологический университет)", г. Владикавказ

ФОРМИРОВАНИЕ ЭФФЕКТИВНЫХ МИКРОПЛЕНОЧНЫХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ С ВОСПРОИЗВОДИМЫМИ ПАРАМЕТРАМИ

Поступила в редакцию 23.03.2021

Микропленочные преобразователи используют при обработке, хранении, передаче и представлении информации, особенно в процессе контроля и измерения физических величин, а также в технологии изготовления наукоемкой продукции. Использование технологических приемов микроэлектроники при создании микропленочных преобразователей позволяет значительно улучшить их эксплуатационные параметры.

Ключевые слова: преобразователь, конструкция, технология, сигнал, структура, размер, элемент, физическая величина, взаимосвязь, процесс

Введение

Значительный интерес к исследованию и созданию микропленочных преобразователей обусловлен ростом потребности в получении информации при обработке, хранении, передаче и

представлении информации [1—18], особенно в процессе контроля и измерения физических величин, а также в технологии изготовления наукоемкой продукции. Микропленочные преобразователи подвергаются воздействию контроли-

руемой физической величины и формируют эквивалентный выходной сигнал, являющийся функцией измеряемой величины [19–24].

Конструктивно-технологические подходы при создании эффективных микропленочных преобразователей с воспроизводимыми параметрами

Микропленочные преобразователи имеют малые размеры, характеризуются малой инерционностью, малым энергопотреблением. Такие преобразователи изготавливают по микроэлектронной технологии, в которой используют групповые методы при формировании структуры, что повышает воспроизводимость параметров, они характеризуются высокой надежностью, совмещаются с устройствами последующей обработки измерительных сигналов и устройствами управления, изготовленными по микроэлектронной технологии. Конструкция и технология изготовления микропленочных преобразователей взаимосвязаны и весьма коррелированы.

При создании микропленочных преобразователей возникают определенные трудности, связанные со значительным уменьшением их размеров, так как размеры чувствительного элемента становятся соизмеримыми с размерами других элементов преобразователя. Поэтому при их проектировании необходимо учитывать значительное число параметров, которые существенно влияют на характеристики микропленочного преобразователя. Это требование значительно усложняет процесс проектирования микропленочных преобразователей. Микропленочные преобразователи характеризуются тем, что при их функционировании существенную роль играют тепловые процессы, используемые при преобразовании измеряемой величины в выходной сигнал.

При создании микропленочных преобразователей можно выделить следующие стадии: при проектировании — определение структуры, которая в наибольшей степени соответствует предъявляемым требованиям, определение конструктивных параметров; при исследовании — определение характеристик, исходя из значений его конструктивных параметров, изучение влияния различных факторов на характеристики; при изготовлении — определение режимов технологических операций изготовления, исходя из его конструктивных параметров; при эксплуата-

ции — определение влияния условий эксплуатации на характеристики, оптимальные режимы функционирования. Результатом соответствия преобразователей является информация о конструктивных параметрах и эксплуатационных характеристиках, режимы технологических операций. Необходимо отметить, что при проектировании, исследовании и эксплуатации микропленочных преобразователей параметры относятся собственно к преобразователю, тогда как при его изготовлении — к технологическим процессам.

При анализе микропленочных преобразователей применяют различные подходы, которые отличаются используемым аппаратом и степенью детализации: системный; на основе распределенных систем; термодинамический; микроскопический. Для решения задач, связанных с проектированием, исследованием и эксплуатацией микропленочных преобразователей, используется подход на основе распределенных систем и системный подход. Микроскопический подход используется для процессов, где осуществляется преобразование измеряемой величины. Термодинамический подход применяется для получения уравнений баланса.

Физические процессы, протекающие в микропленочных преобразователях, приводят к формированию выходного сигнала, который зависит от измеряемой величины. Эта взаимосвязь между измеряемой величиной и выходным сигналом определяется структурой микропленочного преобразователя. Конструктивно микропленочный преобразователь состоит из элементов, которые обеспечивают выполнение заданной функции преобразования измеряемой величины в выходной сигнал. Элементы, используемые в конструкции микропленочного преобразователя: основание, изолированная структура, теплогнерирующие, термочувствительные, проводники, контактные площадки. Структура элементов зависит от физических принципов, используемых при функционировании элементов, применяемых конструкций, технологий изготовления и материалов.

Основание в конструкции микропленочного преобразователя служит основой для крепления изолированной структуры, обеспечивает ее механическую прочность, крепление в корпус, является несущим элементом, на котором располагаются контактные площадки, служащие для присоединения выводов. Выбор материала и

конструкции основания микропленочного преобразователя определяются ее конструктивно-технологическими особенностями. Изолированная структура выполняет роль подложки и служит для размещения других элементов микропленочного преобразователя. В качестве теплогенерирующих элементов применяют поглощающие пленочные слои. Поглощающие пленочные слои используют для преобразования энергии излучения в тепловую энергию.

Термочувствительные элементы выполняют функцию преобразования значения температуры в электрический сигнал. В качестве чувствительных элементов в микропленочных преобразователях используют термоэлектрические преобразователи. В микропленочных преобразователях измеряемая величина преобразуется в тепловой сигнал, а затем в выходной электрический сигнал. Для преобразования измеряемой величины в тепловой сигнал в микропленочных преобразователях используют теплогенерирующий элемент — тонкопленочный поглощающий слой. При прекращении воздействия измеряемой величины выделение теплоты в микропленочных преобразователях также прекращается. В микропленочных преобразователях в качестве термочувствительных элементов используют пленочные термопары, выходной сигнал не имеет смещения и дрейфа и не требует предварительной балансировки.

Пленочные проводники необходимы для электрического соединения между собой элементов микропленочного преобразователя. Контактные площадки служат для присоединения электрических выводов внешних соединений. Для изготовления коммутационных элементов и контактных площадок используют одинаковые материалы и технологические методы. В микропленочных преобразователях при изготовлении чувствительных элементов используются также адгезионные подслои. В качестве адгезионного подслоя применяют тонкие слои хрома, никрома.

Использование технологических приемов микроэлектроники при создании микропленочных преобразователей позволяет значительно улучшить их эксплуатационные параметры.

Заключение

Конструкция и технология изготовления микропленочных преобразователей взаимосвя-

заны и весьма коррелированы. Микропленочные преобразователи изготавливают по микроэлектронной технологии, в которой используют групповые методы при формировании структуры, что повышает воспроизводимость параметров. Эти преобразователи характеризуются высокой чувствительностью, малой инерционностью, малым энергопотреблением, высокой надежностью, совмещаются с устройствами обработки измерительных сигналов. При создании микропленочных преобразователей определяют структуру, которая в наибольшей степени соответствует предъявляемым требованиям, конструктивные параметры, режимы технологических операций изготовления, влияния условий эксплуатации на характеристики, оптимальные режимы функционирования. Конструктивно микропленочный преобразователь состоит из следующих элементов: основания, изолированной структуры, теплогенерирующих, термочувствительных элементов, обеспечивающих передачу электрических сигналов, пленочных проводников и контактных площадок, которые обеспечивают выполнение заданной функции преобразования измеряемой величины в выходной сигнал.

Список литературы

1. **Senturia S. D.** Simulation and design of microsystems: a 10-year perspective // *Sensors and Actuators A. Physical*. 1998. Vol. 67. P. 1—7.
2. **Baltes H., Paul O., Brand O.** Micromachined thermally based CMOS microsensors // *Proceedings of the IEEE*. 1998. Vol. 86. P. 1660—1678.
3. **Herwaarden A. W., Duyn D. C., Oudheusden B. W., Sarro P. M.** Integrated thermopile sensors // *Sensors and Actuators A. Physical*. 1989. Vol. 21—23. P. 621—630.
4. **Middelhoek S., Hoogerwerf A. C.** Classifying solid-state sensors: the 'sensor effect cube' // *Sensors and Actuators*. 1986. Vol. 10. P. 1—8.
5. **Zerrik E., Badraoui L., El Jai A.** Sensors and regional boundary reconstruction of parabolic systems // *Sensors and Actuators A. Physical*. 1999. Vol. 75. P. 102—117.
6. **Al-Saphory R., El Jai A.** Sensors characterizations for regional boundary detectability in distributed parameter systems // *Sensors and Actuators A. Physical*. 2001. Vol. 94. P. 1—10.
7. **Zerrik E., Bourray H. E.** Flux reconstruction: sensors and simulations // *Sensors and Actuators A. Physical*. 2003. Vol. 109. P. 34—46.
8. **Yilammi M.** Thermodynamics of sensors // *Sensors and Actuators*. 1989. Vol. 18. P. 167—178.
9. **Klaassen E. H., Reay R. J., Stormont C., Kovacs T. A.** Micromachined thermally isolated circuits // *Sensors and Actuators A. Physical*. 1997. Vol. 58. P. 43—50.
10. **Mityakov A. V., Sapozhnikov S. Z., Mityakov V. Y., Snarskii A. A., Zhenirovsky M. I., Pyrhönen J. J.** Gradient

heat flux sensors for high temperature environments // Sensors and Actuators A. Physical. 2012. Vol. 176. P. 1–9.

11. **Huang S., Tao H., Lin I.-K., Zhang X.** Development of double-cantilever infrared detectors: Fabrication, curvature control and demonstration of thermal detection // Sensors and Actuators A. Physical. 2008. Vol. 145–146. P. 231–240.

12. **Kersjes R., Mokwa W.** A fast liquid flow sensor with thermal isolation by oxide filled trenches // Sensors and Actuators A. Physical. 1995. Vol. 46–47. P. 373–379.

13. **Neda T., Nakamura K., Takumi T.** A polysilicon flow sensor for gas flow meters // Sensors and Actuators A. Physical. 1996. Vol. 54. P. 626–631.

14. **Sun J., Cui D., Zhang L., Chen X., Cai H., Li H.** Fabrication and characterization of a double-heater based MEMS thermal flow sensor // Sensors and Actuators A. Physical. 2013. Vol. 193. P. 25–29.

15. **Lee M., Yoo M.** Detectivity of thin-film NTC thermal sensors // Sensors and Actuators A. Physical. 2002. Vol. 96. P. 97–104.

16. **Chung W.-Y., Lim J.-W., Lee D.-D., Miura N., Yamazoe N.** Thermal and gas-sensing properties of planar-type micro gas sensor // Sensors and Actuators B. Chemical. 2000. Vol. 64. P. 118–123.

17. **Hung S.-T., Wong S.-C., Fang W.** The development and application of microthermal sensors with a meshmembrane supporting structure // Sensors and Actuators A. Physical. 2000. Vol. 84. P. 70–75.

18. **Fung S. K. H., Tang Z., Chan P. C. H., Sin J. K. O., Cheung P. W.** Thermal analysis and design of a micro-hot-plate for integrated gas-sensor applications // Sensors and Actuators A. Physical. 1996. Vol. 54. P. 482–487.

19. **Herwaarden S.** Physical principles of thermal sensors // Sensors and Materials. 1996. Vol. 8. P. 373–387.

20. **Middelhoek S., Noorlag D. J. W.** Three-dimensional representation of input and output transducers // Sensors and Actuators. 1981. Vol. 2. P. 29–41.

21. **Middelhoek S., Noorlag D. J. W.** Signal conversion in solid-state transducers // Sensors and Actuators. 1982. Vol. 2. P. 211–228.

22. **Barwicz A.** A system approach to electrical measurement // Measurement. 1996. Vol. 19. P. 131–138.

23. **Duyn D. C., Middelhoek S.** Information transduction in solid-state transducers: a general thermodynamic system approach // Sensors and Actuators A. Physical. 1990. Vol. 21–23. P. 25–32.

24. **Völklein F., Baltes H.** Optimization tool for the performance parameters of thermoelectric microsensors // Sensors and Actuators A. Physical. 1993. Vol. 36. P. 65–71.

D. G. Mustafaeva, Ph. D., Associate Professor, dzhamilya79@yandex.ru,
North Caucasian Institute of Mining and Metallurgy (State Technological University), Vladikavkaz,
Russian Federation,

Corresponding author:

Mustafaeva Dzamilya G., Ph. D., Associate Professor, North Caucasian Institute of Mining and Metallurgy
(State Technological University), Vladikavkaz, Russian Federation
E-mail: dzhamilya79@yandex.ru

Formation of Efficient Microfilm Converters with Reproducible Parameters

Received on March 13, 2021

Accepted on April 05, 2021

The use of microfilm converters provides information in the field of processing, storage, transmission and presentation of information, especially in the process of control and measurement of physical quantities, as well as in the technology of manufacturing high technology products. Microfilm transducers form an equivalent output signal, which is a function of the measured quantity; their design and manufacturing technology are interrelated and highly correlated. Microfilm transducers are manufactured using microelectronic technology, in which group methods are used in the formation of a structure, which increases the reproducibility of parameters, are characterized by high sensitivity, low inertia, low power consumption, high reliability, and are combined with measuring signal processing devices. When creating microfilm converters, a structure is determined that most closely meets the requirements, design parameters, modes of manufacturing operations, the effect of operating conditions on characteristics, and optimal modes of operation. Structurally, a microfilm transducer consists of a base, an insulated structure, heat-generating and temperature-sensitive elements that provide the transmission of electrical signals, film conductors and contact pads, which provide a specified function of converting the measured value into an output signal. In microfilm converters, film thermocouples are used as thermosensitive elements, and adhesive sublayers are used in their manufacturing technology. The use of technological methods of microelectronics when creating microfilm converters can significantly improve their operational parameters.

Keywords: converter, design, technology, signal, structure, size, element, value, relationship, process

For citation:

Mustafaeva D. G. Formation of Efficient Microfilm Converters with Reproducible Parameters, *Nano- i mikrosistemnaya tekhnika*, 2021, vol. 23, no. 3, pp. 157–161.

DOI: 10.17587/nmst.23.157-161

References

1. **Senturia S. D.** Simulation and design of microsystems: a 10-year perspective, *Sensors and Actuators A. Physical*, 1998, vol. 67, pp. 1–7.
2. **Baltes H., Paul O., Brand O.** Micromachined thermally based CMOS microsensors, *Proceedings of the IEEE*, 1998, vol. 86, pp. 1660–1678.
3. **Herwaarden A. W., Duyn D. C., Oudheusden B. W., Sarro P. M.** Integrated thermopile sensors, *Sensors and Actuators A. Physical*, 1989, vol. 21–23, pp. 621–630.
4. **Middelhoek S., Hoogerwerf A. C.** Classifying solid-state sensors: the 'sensor effect cube', *Sensors and Actuators*, 1986, vol. 10, pp. 1–8.
5. **Zerrik E., Badraoui L., El Jai A.** Sensors and regional boundary state reconstruction of parabolic systems, *Sensors and Actuators A. Physical*, 1999, vol. 75, pp. 102–117.
6. **Al-Saphory R., El Jai A.** Sensors characterizations for regional boundary detectability in distributed parameter systems, *Sensors and Actuators A. Physical*, 2001, vol. 94, pp. 1–10.
7. **Zerrik E., Bourray H. E.** Flux reconstruction: sensors and simulations, *Sensors and Actuators A. Physical*, 2003, vol. 109, pp. 34–46.
8. **Yilammi M.** Thermodynamics of sensors, *Sensors and Actuators*, 1989, vol. 18, pp. 167–178.
9. **Klaassen E. H., Reay R. J., Storment C., Kovacs T. A.** Micromachined thermally isolated circuits, *Sensors and Actuators A. Physical*, 1997, vol. 58, pp. 43–50.
10. **Mityakov A. V., Sapozhnikov S. Z., Mityakov V. Y., Snarskii A. A., Zhenirovsky M. I., Pyrhönen J. J.** Gradient heat flux sensors for high temperature environments, *Sensors and Actuators A. Physical*, 2012, vol. 176, pp. 1–9.
11. **Huang S., Tao H., Lin I.-K., Zhang X.** Development of double-cantilever infrared detectors: Fabrication, curvature control and demonstration of thermal detection, *Sensors and Actuators A. Physical*, 2008, vol. 145–146, pp. 231–240.
12. **Kersjes R., Mokwa W.** A fast liquid flow sensor with thermal isolation by oxide filled trenches, *Sensors and Actuators A. Physical*, 1995, vol. 46–47, pp. 373–379.
13. **Neda T., Nakamura K., Takumi T.** A polysilicon flow sensor for gas flow meters, *Sensors and Actuators A. Physical*, 1996, vol. 54, pp. 626–631.
14. **Sun J., Cui D., Zhang L., Chen X., Cai H., Li H.** Fabrication and characterization of a double-heater based MEMS thermal flow sensor, *Sensors and Actuators A. Physical*, 2013, vol. 193, pp. 25–29.
15. **Lee M., Yoo M.** Detectivity of thin-film NTC thermal sensors, *Sensors and Actuators A. Physical*, 2002, vol. 96, pp. 97–104.
16. **Chung W.-Y., Lim J.-W., Lee D.-D., Miura N., Yamazoe N.** Thermal and gas-sensing properties of planar-type micro gas sensor, *Sensors and Actuators B. Chemical*, 2000, vol. 64, pp. 118–123.
17. **Hung S.-T., Wong S.-C., Fang W.** The development and application of microthermal sensors with a meshmembrane supporting structure, *Sensors and Actuators A. Physical*, 2000, vol. 84, pp. 70–75.
18. **Fung S. K. H., Tang Z., Chan P. C. H., Sin J. K. O., Cheung P. W.** Thermal analysis and design of a micro-hotplate for integrated gas-sensor applications, *Sensors and Actuators A. Physical*, 1996, vol. 54, pp. 482–487.
19. **Herwaarden S.** Physical principles of thermal sensors, *Sensors and Materials*, 1996, vol. 8, pp. 373–387.
20. **Middelhoek S., Noorlag D. J. W.** Three-dimensional representation of input and output transducers, *Sensors and Actuators*, 1981, vol. 2, pp. 29–41.
21. **Middelhoek S., Noorlag D. J. W.** Signal conversion in solid-state transducers, *Sensors and Actuators*, 1982, vol. 2, pp. 211–228.
22. **Barwicz A.** A system approach to electrical measurement, *Measurement*, 1996, vol. 19, pp. 131–138.
23. **Duyn D. C., Middelhoek S.** Information transduction in solid-state transducers: a general thermodynamic system approach, *Sensors and Actuators A. Physical*, 1990, vol. 21–23, pp. 25–32.
24. **Völklein F., Baltes H.** Optimization tool for the performance parameters of thermoelectric microsensors, *Sensors and Actuators A. Physical*, 1993, vol. 36, pp. 65–71.

ПРИМЕНЕНИЕ МНСТ

APPLICATION OF MNST

УДК 662.1: 621.35

DOI: 10.17587/nmst.23.162-168

В. В. Просянюк¹, канд. техн. наук, нач. отдела, e-mail: vvp101250@mail.ru,
Н. В. Прудников², д-р техн. наук, гл. научн. сотр., e-mail: mzairan@mzairan.ru,
И. С. Суворов¹, канд. техн. наук, вед. научн. сотр., e-mail: suvorov_i47@mail.ru,
Б. Ю. Паршиков³, вед. научн. сотр., e-mail: parshikov62@rambler.ru,
М. В. Дюбанов², нач. отд., e-mail: mzairan@mzairan.ru

¹ Акционерное общество "Федеральный научно-производственный центр

"Научно-исследовательский институт прикладной химии" г. Сергиев Посад,

² Федеральное государственное бюджетное учреждение науки "Межведомственный центр аналитических исследований в области физики, химии и биологии при Президиуме Российской академии наук" г. Москва,

³ ЗАО "Московский научно-исследовательский телевизионный институт"

О ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНЫХ ГАЛЬВАНИЧЕСКИХ ЭЛЕМЕНТАХ РЕЗЕРВНЫХ ИСТОЧНИКОВ ТОКА НА ОСНОВЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ КОНДЕНСИРОВАННЫХ СИСТЕМ

Поступила в редакцию 24.02.2021

Проведены исследования воспламенения, горения и электрохимических процессов, протекающих в тонких многослойных высокотемпературных гальванических элементах из малогазовых энергетических конденсированных систем. Результаты исследований обеспечили возможность создания широкого спектра многофункциональных резервных источников тока с улучшенными характеристиками, отличающихся назначением, способами задействия, временами активации и работы, габаритными размерами и формой.

Ключевые слова: энергетические конденсированные системы, высокотемпературные гальванические элементы, резервные источники тока

Введение

Необходимость совершенствования источников тока, способных функционировать в экстремальных условиях, является одной из важнейших задач в нашей стране и за рубежом, так как миниатюрные средства резервной электроэнергетики во многом определяют качество работы аппаратуры, возможность совершенствования и стоимость применения объектов нового поколения [1–5].

Особенности высокотемпературных гальванических элементов на основе малогазовых энергетических конденсированных систем

Источники тока на основе малогазовых энергетических конденсированных систем (ЭКС) имеют высокую удельную мощность, длительные

сроки хранения, обеспечивают возможность автономного приведения в действие приборов и устройств различного назначения в нормальных и экстремальных условиях, не имеют зарубежных аналогов. Прямое преобразование химической энергии ЭКС в электрическую энергию происходит при сгорании тонких многослойных высокотемпературных гальванических элементов (ВГЭ), безгазовое горение которых сопровождается протеканием электрохимических процессов. Поэтому создание нового поколения миниатюрных резервных источников тока (батарей ВГЭ) требует решения сложных фундаментальных проблем, связанных с безгазовым горением, высокотемпературной электрохимией и самораспространяющимся высокотемпературным синтезом (СВС) композиционных материалов [6–9].

Активирование батарей ВГЭ (возможность протекания высокотемпературных электрохимических процессов, обеспечивающих заданные электрические характеристики) происходит после воспламенения и сгорания тонких многослойных малогазовых композиций, содержащих электролитный материал. При этом электроды ВГЭ становятся продуктами сгорания с избытком металлического горючего в аноде и избытком окислителя в катоде, контактирующими с общим ионопроводящим расплавом электролита.

В качестве рецептурной и структурной основы для формирования вариантов технического облика батарей ВГЭ выбраны пиронагреватели (ПН), содержащие тонкодисперсные порошки циркония, бария хромовокислого, оксида меди, диоксида циркония и волокнистого асбеста, предназначенные для приведения в действие резервных термохимических источников тока (ТХИТ). Эти изделия толщиной 0,5...1,5 мм воспламеняются и сгорают в составе ТХИТ между металлическими корпусами электрохимических элементов при поджати давления до 15 МПа при температуре ± 60 °С и воздействии интенсивных механических нагрузок. Экспериментально подтверждена высокая надежность воспламенения и сгорания пиронагревателей в этих условиях. Они допускают значительные изменения рецептуры и введение инертных добавок [10—17]. Горючее (цирконий) и окислители (оксид меди и барий хромовокислый) являются активными электродными материалами, что позволило создать на их основе ВГЭ в виде тонких многослойных ПН с рецептурами анода, катода, сепаратора и т. д.

При сгорании ВГЭ обеспечиваются условия, необходимые для преобразования части химической энергии композиций в режиме горения в электрическую энергию для задействования и питания потребителей в широком интервале начальных температур и при экстремальных условиях. Разработаны ЭКС с высокой чувствительностью к тепловому инициирующему импульсу для минимизации времени задержки воспламенения ВГЭ и сгоранию их с необходимой скоростью в тонком слое между металлическими пластинами-токоотводами (при интенсивном отводе теплоты из зоны горения). Минимальная толщина ВГЭ необходима для оптимизации габаритно-массовых характеристик источников тока. Надежное воспламенение и сгорание ВГЭ в этих условиях происходит при толщине, превышающей критическое значение (меньше которого горение невозможно).

Продукты сгорания ВГЭ должны сохранять размеры и форму исходного образца для обеспечения надежности контактов в электрической цепи и исключения возможности дестабилизации электрических характеристик — появления шумов, провалов, подкороток и т. д. В резервных источниках тока легкоплавкий электролитный материал должен быть диэлектриком при температуре от минус 60 до плюс 85 °С для обеспечения термодинамической устойчивости электрохимических систем. Для формования ВГЭ вакуумным осаждением водной взвеси все компоненты должны быть нерастворимы в воде. Этим требованиям соответствуют фториды лития и щелочноземельных металлов, являющиеся электролитным материалом. Их расплавы имеют высокую чисто ионную проводимость, а в твердом состоянии они являются кристаллическими соединениями, что исключает саморазряд и обеспечивает гарантийный срок изделий ≥ 25 лет.

Прохождение фронта горения по ВГЭ дает возможность протекания электрохимических реакций с активным участием жидкой фазы (расплавленного электролита) между пространственно разделенными продуктами сгорания электродных элементов (металлом и окислителем). Образующиеся при этом анодный и катодный потенциалы (напряжение разомкнутой цепи) обеспечивают генерирование постоянного электрического тока при замыкании внешней цепи на омическое сопротивление. Прямое преобразование химической энергии электродных композиций в электрическую энергию в этих условиях происходит при наличии:

- двух электродов с разными потенциалами;
- ионопроводящего электролита, контактирующего с электродами;
- внешней электропроводящей цепи, замкнутой на нагрузку.

Генерирование электрического тока продолжается до израсходования активных электродных материалов или/и кристаллизации электролита при остывании.

Проектирование ВГЭ заключается в поиске технико-экономических решений, в наибольшей степени соответствующих требованиям надежного воспламенения, безгазового горения и высокотемпературной электрохимии [18]. Электрические характеристики батарей ВГЭ определяет, прежде всего, напряжение разомкнутой цепи ячейки, равное 1,5 В, поэтому ВГЭ соединяют между собой последовательно или/и параллельно металлическими фольговыми пластинами из нержавеющей стали (токоотводами) адекватной

формы для обеспечения заданных электрических характеристик. Изделия могут быть миниатюрными (объем до $0,5 \text{ см}^3$, диаметр и высота до 10 мм), допускают возможность адаптации к конкретным геометрическим формам конструктивных элементов питаемой аппаратуры. Они могут быть размещены в свободных объемах объектов в любом удобном для потребителя положении, работают как при разрезании, так и при избыточном давлении, а также воздействию температуры до 2000 К, например при пожаре и т. д.

Эффективность источников тока на основе ЭКС обеспечена высокой вероятностью задействования от штатных электрических и механических средств инициирования, контакта с нагретой поверхностью и т. п. Следует отметить, что воспламенение набора ВГЭ является сложным процессом, так как толщина металлических токоотводов может составлять от 10 до 60 % толщины ВГЭ. Значительная часть энергии теплового иницирующего импульса расходуется на нагрев токоотводов и плавление электролита. Чем меньше соотношение толщин ячейки и токоотводов и меньше пористость ВГЭ, тем интенсивнее отвод теплоты из зоны горения. Практически одновременно можно зажечь все ВГЭ быстрогорящими ленточными воспламенительными ПН, контактирующими с боковой поверхностью набора. При задержке воспламенения, хотя бы одной ячейки, снижается мощность и растет время достижения источником тока рабочих характеристик.

Режим безгазового горения ВГЭ, обеспечивающий возможность генерирования электрического тока, исключает применение в источниках тока конструктивных и теплоэлектроизоляционных элементов из органических материалов, так как температура в зоне реакций может превышать $1500 \text{ }^\circ\text{C}$. В металлический корпус источника тока укладывают в определенной последовательности ВГЭ, металлические токоотводы и токовыводы, а также электро- и теплоизоляторы из асбестовой бумаги (или другого неорганического материала) на внутреннюю боковую поверхность и дно металлического корпуса.

Электродные, электролитные и другие элементы для ВГЭ формируют из заготовок типа "асбестовой энергетической бумаги", которую получают вакуумным осаждением соответствующих водных взвесей ЭКС с хризотилловым асбестом, имеющим теоретическую формулу $3\text{MgO} \cdot 2\text{SiO}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$. Применение асбеста в качестве связующего обеспечивает минимальный объем газообразных продуктов сгорания и воз-

можность получения тонких элементов ($<0,5 \text{ мм}$) с достаточной механической прочностью. При этом происходит переплетение волокон асбеста и порошкообразных компонентов с образованием структуры, подобной бумаге или тонкому шиферу [19]. Внешний вид электродных элементов и уплотненных ВГЭ приведен на рис. 1 и 2 (см. четвертую сторону обложки).

Следует отметить, что прочность и гибкость электродов из ЭКС, ВГЭ и воспламенительных элементов достаточны для размещения батарей гибких ВГЭ внутри объектов применения (в том числе без собственного корпуса). Внешний вид таких ВГЭ и их батареи приведены на рис. 3 (см. четвертую сторону обложки).

Двухслойные ВГЭ, содержащие электролитный материал, например фторид лития, имеют высокую мощность и импульсный характер работы (время генерирования тока $\sim 1 \text{ с}$). Они эффективны для задействования мощных потребителей, зарядки накопителей электрической энергии (конденсаторов и суперконденсаторов) с малым внутренним сопротивлением и т. д. ВГЭ источников тока, предназначенных для длительного питания потребителей, содержат сепараторы из одного или нескольких элементов, исключающих электронный контакт между электродами.

Крепление набора ВГЭ осуществляют поджатием и закаткой бортика корпуса на упор. Такая конструкция источника тока обеспечивает условия для эффективного протекания токообразующих процессов и практическое использование генерируемой электрической энергии — хороший контакт между электродами и электролитом, отвод тока к потребителю с минимальными омическими потерями, равномерность работы всех ВГЭ и электродов, механическую прочность и т. д.

Температурные, механические и иные воздействия могут оказывать определенное влияние на характеристики изделий на основе ЭКС. Влияние температуры сводится к изменению скорости протекания химических процессов (по этой причине — на время активации). Температура окружающей среды от минус 60 до плюс $85 \text{ }^\circ\text{C}$ оказывает незначительное влияние на электрохимические процессы и электрические характеристики источников тока, так как генерирование электрического тока может происходить только выше температуры плавления электролитного материала.

Сгорание тонких ВГЭ между металлическими токоотводами является необходимым условием преобразования химической энергии электрод-

ных композиций в электрическую энергию. При этом выделяется не менее 2,2 кДж/г теплоты, обеспечивающих быстрое плавление электролитного материала при начальной температуре от минус 60 до 85 °С и минимальное количество газообразных продуктов (в основном примесей, адсорбированных на компонентах). Высокотемпературные процессы протекают в конденсированной фазе, поэтому разрежение и избыточное давление оказывают незначительное влияние на скорость горения. Она практически неизменна при уменьшении давления окружающей среды от нормальных условий до значительных разрежений. Атмосферное давление оказывает влияние на процессы испарения и десорбции летучих примесей из компонентов, материалов и т. д., не оказывая практического влияния на скорость термического разложения окислителей и процессы, протекающие в конденсированной фазе (в расплаве).

Экспериментально подтверждено испытаниями в барокамере, что скорость горения тонких ВГЭ на основе порошков циркония, бария хромовокислого оксида меди и электрические характеристики их батарей не зависят от внешнего давления (в пределах погрешности опытов) [18].

Отмечено снижение максимального напряжения и времени генерирования электрического тока при повышенном давлении окружающей среды (воздуха). Это обусловлено, по-видимому, уменьшением количества активного тонкодисперсного циркония в сгоревшем анодном элементе и пассивацией электрода в этих условиях, вызванных активным окислением циркония кислородом и азотом воздуха, а также парами одновалентного оксида меди из катода.

Воздействие экстремальных механических нагрузок не оказывает влияния на процессы зажигания набора ВГЭ продуктами сгорания электрических и механических средств инициирования, так как они распространяются примерно со скоростью звука. Механические воздействия оказывают незначительное влияние на скорость горения тонких (~1 мм) ВГЭ, сгорающих в безгазовом режиме между металлическими токоотводами (в сжатом состоянии), так как перегрузки соизмеримы с капиллярными силами.

Например, вращение ВГЭ оказывает влияние на скорость горения при наличии расплава в зоне горения. При этом возможны изменение формы поверхности горения и рецептуры зарядов, так как может происходить фильтрация частиц, находящихся в жидкости (центробежные силы действуют на твердые частицы в соответ-

ствии с их плотностями и размерами) и т. д. Это оказывает влияние на процессы передачи теплоты из высокотемпературной зоны, на скорость горения, диспергирование и т. п. Влияние вращения на скорость горения зависит от степени совпадения направления фронта горения и вектора перегрузки. Например, для тонких ВГЭ с центральным каналом (при воспламенении из центра) вращение способствует увеличению скорости горения. Процессы протекают в этом случае с улучшением контакта высокотемпературного расплава со свежими слоями композиций из ЭКС. Это способствует улучшению условий передачи теплоты и росту скорости горения.

Если фронт горения распространяется от периферии к центру, то направления векторов перегрузки и скорости противоположны, что ослабляет влияние факторов, приводящих к ускоренному горению. Следует отметить, что упомянутые эффекты, вызванные действием массовых сил, реализуются при соблюдении следующих условий:

- при горении пористых композиций давление, оказываемое массовыми силами на жидкую фазу, должно быть соизмеримо или больше капиллярных сил;

- движение расплава может происходить продавливанием его в поры. При этом движущаяся жидкость может захватывать тонкодисперсные частицы и перемещать их, оказывая влияние на рецептуру.

Воздействие вибрационных нагрузок на процессы горения может сопровождаться изменением скорости, начиная с определенной пороговой интенсивности. Виброперемешивание продуктов реакции в жидкой фазе гомогенизирует ее структуру, оказывая влияние на капиллярное растекание расплавов, полноту использования компонентов и скорость высокотемпературных процессов. Необходимы исследования для установления предельных механических нагрузок, вызывающих недопустимые изменения рецептуры (в том числе вытекание жидкой фазы), размеров (увеличение центрального канала) и т. д., оказывающих отрицательное влияние на характеристики источников тока. Сгорание тонких ВГЭ между металлическими токоотводами в сжатом состоянии существенно снижает возможности вытекания расплавов, расслоения, изменения размеров и т. д.

Полнота преобразования химической энергии электродных композиций в электрическую энергию, а также стабильность характеристик ВГЭ и их батарей при воздействии экстремаль-

ных механических нагрузок, температур, давления и т. д. связаны с чувствительностью к ним процессов горения элементарных ячеек в условиях интенсивного отвода теплоты. Характеристики этих источников тока могут быть улучшены за счет разработки и применения:

— новых конструктивных и технологических решений, обеспечивающих оптимальную структуру продуктов сгорания и их максимальную электропроводность;

— легкоплавких ионопроводящих электролитных материалов, увеличивающих продолжительность генерирования электрического тока;

— оптимальных схем коммутации ВГЭ в блоки, а блоков в батарее с единой электрической цепью;

— новых технологических приемов подготовки электродных, электролитных и вспомогательных материалов (путем их модифицирования);

— токоотводов из максимально тонких тугоплавких металлов с высокой электропроводностью, не образующих диэлектрических оксидных пленок, а также за счет уплотнения ВГЭ и опрессовки их набора в целях сохранения качества электрических контактов при генерировании тока, минимизирующих внутреннее сопротивление.

Механические нагрузки, оказывающие незначительное влияние на скорость горения тонких (~1 мм) ВГЭ, соответственно, не ухудшают электрические характеристики источников тока, если продукты сгорания ВГЭ сохраняют исходные размеры и форму. Для исключения возможности вытекания расплава при интенсивных нагрузках в электролитные материалы вводят тонкодисперсные загустители. Основными показателями их пригодности являются тугоплавкость, химическая инертность по отношению к электродам, продуктам электродных реакций и расплаву электролита.

Наполнители, минимизирующие вытекание расплава, должны быть тонкодисперсными (размер частиц ~1 мкм, удельная поверхность до нескольких квадратных метров на 1 г). Концентрация загустителя в электролитной композиции должна быть минимальна, так как он не является активным компонентом. В большинстве случаев количество добавки не превышает 20 % по массе.

Время активации может быть уменьшено воспламенением набора ВГЭ не только с боковой поверхности набора, но и по центральному каналу. Применение перфорированных металлических токоотводов и ВГЭ обеспечивает повышенную надежность задействования дублированием

огневой воспламенительной цепи, но усложняет процесс изготовления и незначительно снижает электрические характеристики источников тока.

Результаты исследования высокотемпературных процессов, протекающих в ВГЭ при экстремальных условиях, обеспечили возможность создания широкого спектра многофункциональных резервных источников питания, отличающихся назначением, способами задействования, временами активации и работы, габаритными размерами и формой. Внешний вид некоторых современных батарей ВГЭ приведен на рис. 4 (см. четвертую сторону обложки).

Заключение

Исследование высокотемпературных процессов, протекающих при сгорании тонких ВГЭ с легкоплавким инертным компонентом, является актуальной задачей как для создания и совершенствования резервных источников тока на основе ЭКС, так и для получения методом СВС многослойных композитов различного назначения [20–23].

Прямое преобразование химической энергии композиций в электрическую энергию в режиме горения является новым направлением высокотемпературной электрохимии. На основе ВГЭ выпускают серийно и разрабатывают новые многофункциональные резервные источники тока.

Список литературы

1. **Афанасьев А. С., Болдырев М. А., Халютин С. П.** Анализ номенклатуры химических источников тока, применяемой в объектах специального назначения // *Электропитание*. 2018. № 1. С. 40–49.
2. **Bagotskii V. S., Skundin A. M., Volkovich Yu. M.** *Electrochemical power sources: batteries, fuel cells, and supercapacitors*. — New Jersey: John Wiley & Sons, 2015. 375 p.
3. **Linden D., Reddy T.** *Handbook of batteries*. London: McGraw-Hill, 2014. 4d ed.
4. **Денискин А. Г.** Резервные тепловые источники тока. Этапы развития и перспективы // *Автономная энергетика*. 2014. № 5. С. 46–51.
5. **Koch E.-C.** Special materials in pyrotechnics VII: Pyrotechnics used in thermal batteries // *Defence Technology*. 2019. № 15. P. 254–263.
6. **Присянюк В. В., Паршиков Б. Ю., Прудников Н. В., Суворов И. С.** Миниатюрные резервные источники питания на основе энергетических конденсированных систем // *Нано- и микросистемная техника*. 2019. Т. 21, № 6. С. 377–384.
7. **Присянюк В. В., Суворов И. С., Паршиков Б. Ю., Прудников Н. В.** К вопросу о миниатюрных источниках тока на основе энергетических конденсированных систем // *Нано- и микросистемная техника*. 2020. Т. 22, № 4. С. 220–227.
8. **Присянюк В. В., Сигейкин Г. И., Суворов И. С., Колединский Г. М.** Миниатюрные резервные источники

тока на основе энергетических конденсированных систем // Нано- и микросистемная техника. 2008. № 7. С. 37–40.

9. **Daulbayev Ch. B., Dmitriev T. R., Sultanov F. R.** et al. Study of Operating Characteristics of Pyrotechnic Reserve Power Source Based on Magnesium and Zinc // Eurasian Chemico-Technological Journal. 2016. N. 18. P. 317–323.

10. **Кукоз Ф. И., Труш Ф. Ф., Кондратенков В. И.** Тепловые источники тока. — Ростов-на-Дону: Изд. Ростовского университета, 1989. 175 с.

11. **Химические** источники тока: Справочник / Под ред. Н. В. Коровина и А. М. Скундина. М.: Изд. МЭИ, 2003. 740 с.

12. **75 лет** АО "Энергия": разработка и производство химических источников тока. Елец: АО "Энергия", 2016. 104 с.

13. **Guidotti R. A., Masset P.** Thermally activated (thermal) battery technology // Journal of Power Sources. 2006. Vol. 161. P. 1443–1449.

14. **Masset P., Guidotti R. A.** Thermal activated (thermal) battery technology. Part II. Molten salt electrolytes // Journal of Power Sources. 2007. Vol. 164. P. 397–414.

15. **Hae-Won Cheong, Seung-Ho Kang, Jong-Myong Kim, Sung-Baek Cho.** Enhanced salt coating on FeS₂ surface with the addition of Li₂O // Journal of Ceramic Processing Research. 2012. Vol. 13. P. 198–201.

16. **Brant W. R., Roberts M., Gustafsson T.** et al. A large format in operando wound cell for analyzing the structural dynamics of lithium insertion materials // Journal of Power Sources. 2016. Vol. 336. P. 279–285.

17. **Payne Ju. L., Giagloglou K., Carins G. M.** et al. In-situ Studies of High Temperature Thermal Batteries: a Perspective // Frontiers in Energy Research. 2018. Vol. 6. P. 1–6.

18. **Вагонов С. Н., Просянюк В. В., Суворов И. С.** и др. Резервные источники тока на основе энергетических конденсированных систем. Итоги науки. Вып. 21. Избранные труды Всероссийской конференции по проблемам новых технологий. М.: Изд. РАН, 2015. С. 94–117 (гл. 5).

19. **Берней И. И.** Теория формирования асбестоцементных листов и труб. М.: Стройиздат, 1988. 288 с.

20. **Баринов В. Ю., Вадченко С. Г., Щукин А. С.** и др. Экспериментальное исследование горения трехслойных конденсированных систем // Успехи современной науки. 2016. Т. 11, № 6. С. 7–12.

21. **Barinov V. Yu., Kovalev D. Yu., Vadchenko S. G.** et al. Direct Conversion of Chemical Energy into Electrical Energy in the Combustion of a Thin Three-Layer Charge // Combustion, Explosion, and Shock Waves. 2019. Vol. 55. N. 6. P. 678–685.

22. **Прокофьев В. Г., Смоляков В. К.** Влияние плавления инертного компонента и растекания расплава на нестационарные режимы горения безгазовых систем // Физика горения и взрыва. 2018. Т. 54, № 1. С. 27–32.

23. **Прокофьев В. Г., Лапшин О. В., Смоляков В. К.** Макрокинетика горения слоевых композиций с легкоплавким инертным слоем // Вестник Томского государственного университета. Математика и механика. 2018. № 52. С. 102–113.

V. V. Prosyanyuk¹, Head of Department, **N. V. Prudnikov²**, Principal Researcher,

I. S. Suvorov¹, Leading Researcher, **B. Yu. Parshikov³**, Leading Researcher,

M. V. Dyubanov², Head of Materials Department

¹ JSC "Federal Research and Production Center "Research Institute of Applied Chemistry", Sergiev Posad, Russian Federation,

² Federal State Budgetary Institution of Science "Interdepartmental Center for Analytical Research in Physics, Chemistry and Biology at the Presidium of the Russian Academy of Sciences", Moscow, Russian Federation

³ Closed Joint-Stock Company Moscow Scientific Research Television Institute, Moscow, Russian Federation

Corresponding author:

Dyubanov M. V., Head of Materials Department, Federal State Budgetary Institution of Science "Interdepartmental Center for Analytical Research in Physics, Chemistry and Biology at the Presidium of the Russian Academy of Sciences", Moscow, Russian Federation

E-mail: mzairan@mzairan.ru

On High-Temperature Galvanic Elements of Standby Power Supply Sources based on Energy Condensed Systems

Received on February, 24, 2021

Accepted on March, 15, 2021

Study of ignition, combustion and electrochemical processes occurring in thin multilayer high-temperature galvanic elements derived from low-gas energy condensed systems was carried out. The research results made it possible to design a wide range of multifunctional standby power supply sources with improved performance, differing in application types, initiation modes, activation and operation times, overall dimensions and shape.

Keywords: energy condensed systems, high-temperature galvanic elements, standby power supply sources

For citation:

Prosyanyuk V. V., Prudnikov N. V., Suvorov I. S., Parshikov B. Yu., Dyubanov M. N. On High-Temperature Galvanic Elements of Standby Power Supply Sources based on Energy Condensed Systems, *Nano- i mikrosistemnaya tekhnika*, 2021, vol. 23, no. 3, pp. 162–168.

DOI: 10.17587/nmst.23.162-168

References

1. **Afanas'ev A. S., Boldyrev M. A., Halyutin S. P.** Analiz nomenklatury himicheskikh istochnikov toka, primenyaemoj v ob'ektah special'nogo naznacheniya, *Elektropitanie*, 2018, no. 1, pp. 40–49 (in Russian).
2. **Bagotskii V. S., Skundin A. M., Volkovich Yu. M.** Electrochemical power sources: batteries, fuel cells, and supercapacitors. — New Jersey: John Wiley & Sons. 2015. — 375 p.
3. **Linden D., Reddy T.** Handbook of batteries. — London: McGraw-Hill. 2014. — 4d ed.
4. **Deniskin A. G.** Rezervnye teplovye istochniki toka. Etapy razvitiya i perspektivy, *Avtonomnaya energetika*, 2014, no. 5, pp. 46–51 (in Russian).
5. **Koch E.-C.** Special materials in pyrotechnics VII: Pyrotechnics used in thermal batteries, *Defence Technology*. 2019 no. 15, pp. 254–263.
6. **Prosyanyuk V. V., Parshikov B. Yu., Prudnikov N. V., Suvorov I. S.** Miniaturnye rezervnye istochniki pitaniya na osnove energeticheskikh kondensirovannykh system, *Nano- i mikrosistemnaya tekhnika*, 2019, vol. 21, no. 6, pp. 377–384 (in Russian).
7. **Prosyanyuk V. V., Suvorov I. S., Parshikov B. Yu., Prudnikov N. V.** K voprosu o miniaturnykh istochnikakh toka na osnove energeticheskikh kondensirovannykh sistem, *Nano- i mikrosistemnaya tekhnika*, 2020, vol. 22, no. 4, pp. 220–227 (in Russian).
8. **Prosyanyuk V. V., Sigejkin G. I., Suvorov I. S., Koldinskij G. M.** Miniaturnye rezervnye istochniki toka na osnove energeticheskikh kondensirovannykh sistem, *Nano- i mikrosistemnaya tekhnika*, 2008, no. 7, pp. 37–40 (in Russian).
9. **Daulbayev Ch. B., Dmitriev T. R., Sultanov F. R.** et al. Study of Operating Characteristics of Pyrotechnic Reserve Power Source Based on Magnesium and Zinc, *Eurasian Chemico-Technological Journal*, 2016, no. 18, pp. 317–323.
10. **Kukoz F. I., Trush F. F., Kondratenkov V. I.** Teplovye istochniki toka. — Rostov-na-Donu: Izd. Rostovskogo universiteta. 1989. — 175 p. (in Russian).
11. **Himicheskie istochniki toka: Spravochnik / Eds. N. V. Korovin, A. M. Skundin.** — Moscow, Izd. MEI. 2003, 740 p. (in Russian).
12. **75 let AO "Energiya": razrabotka i proizvodstvo himicheskikh istochnikov toka.** — Elec: AO "Energiya". 2016. 104 p. (in Russian).
13. **Guidotti R. A., Masset P.** Thermally activated (thermal) battery technology, *Journal of Power Sources*, 2006, vol. 161, pp. 1443–1449.
14. **Masset P., Guidotti R. A.** Thermal activated (thermal) battery technology — Part II. Molten salt electrolytes, *Journal of Power Sources*, 2007, vol. 164, pp. 397–414.
15. **Hae-Won Cheong, Seung-Ho Kang, Jong-Myong Kim, Sung-Baek Cho.** Enhanced salt coating on FeS₂ surface with the addition of Li₂O, *Journal of Ceramic Processing Research*, 2012, vol. 13, pp. 198–201.
16. **Brant W. R., Roberts M., Gustafsson T. et al.** A large format in operando wound cell for analyzing the structural dynamics of lithium insertion materials, *Journal of Power Sources*, 2016, vol. 336, pp. 279–285.
17. **Payne Ju. L., Giagloglou K., Carins G. M.** et al. In-situ Studies of High Temperature Thermal Batteries: a Perspective, *Frontiers in Energy Research*, 2018, vol. 6, pp. 1–6.
18. **Vagonov S. N., Prosyanyuk V. V., Suvorov I. S.** et al. Rezervnye istochniki toka na osnove energeticheskikh kondensirovannykh sistem. Itogi nauki. *Vypusk 21. Izbrannye trudy Vserossijskoj konferencii po problemam novykh tekhnologij* — Moscow, RAN, 2015, pp. 94–117 (glava 5). (in Russian).
19. **Bernej I. I.** Teoriya formovaniya asbestocementnykh listov i trub. — Moscow, Strojizdat. 1988. — 288 p. (in Russian).
20. **Barinov V. Yu., Vadchenko S. G., Shchukin A. S.** et al. Eksperimental'noe issledovanie goreniya tryohslojnykh kondensirovannykh sistem, *Uspekhi sovremennoj nauki*, 2016, vol. 11, no. 6, pp. 7–12 (in Russian).
21. **Barinov V. Yu., Kovalev D. Yu., Vadchenko S. G.** et al. Direct Conversion of Chemical Energy into Electrical Energy in the Combustion of a Thin Three-Layer Charge, *Combustion, Explosion, and Shock Waves*, 2019, vol. 55, no. 6, pp. 678–685.
22. **Prokofev V. G., Smolyakov V. K.** Vliyaniye plavleniya inertnogo komponenta i rastekaniya rasplava na nestacionarnyye rezhimy goreniya bezgazovykh sistem, *Fizika goreniya i vzyryva*, 2018, vol. 54, no. 1, pp. 27–32 (in Russian).
23. **Prokofev V. G., Lapshin O. V., Smolyakov V. K.** Makrokinetika goreniya sloe-vykh kompozitsiy s legkoplavkim inertnym sloem, *Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo universiteta. Matematika i mekhanika*. 2018, no. 52, pp. 102–113 (in Russian).

Адрес редакции журнала: 107076, Москва, Стромьинский 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 19.03.2021. Подписано в печать 24.04.2021. Формат 60×88 1/8. Заказ МС321. Цена договорная
Оригинал-макет ООО «Авансед солюшнз». Отпечатано в ООО «Авансед солюшнз». 119071, г. Москва, Ленинский пр-т, д. 19, стр. 1. Сайт: www.aov.ru

Рисунок к статье М. А. Барулиной, Д. В. Кондратова, С. А. Галкиной
**«АНАЛИТИЧЕСКОЕ РЕШЕНИЕ УРАВНЕНИЙ ДВИЖЕНИЯ
 ЧУВСТВИТЕЛЬНОГО ЭЛЕМЕНТА НАНОСЕНСОРА
 КАК ПРЯМОУГОЛЬНОЙ СВОБОДНО ОПЕРТОЙ НАНОПЛАСТИНЫ»**

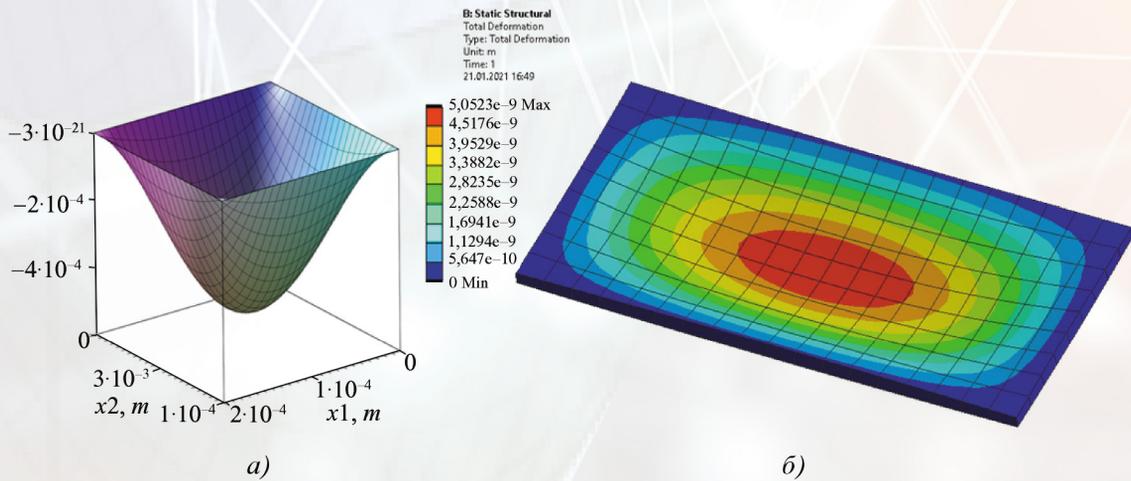


Рис. 2. Результат моделирования изгиба нанопластины под действием равномерно распределенной нагрузки: *a* – расчет в Maple; *б* – конечно-элементный анализ в Ansys

Рисунки к статье А. С. Койгерова
**«ЛЕСТНИЧНЫЕ ФИЛЬТРЫ НА ВЫТЕКАЮЩИХ ПОВЕРХНОСТНЫХ
 АКУСТИЧЕСКИХ ВОЛНАХ НА ПОДЛОЖКЕ НИОБАТА ЛИТИЯ»**

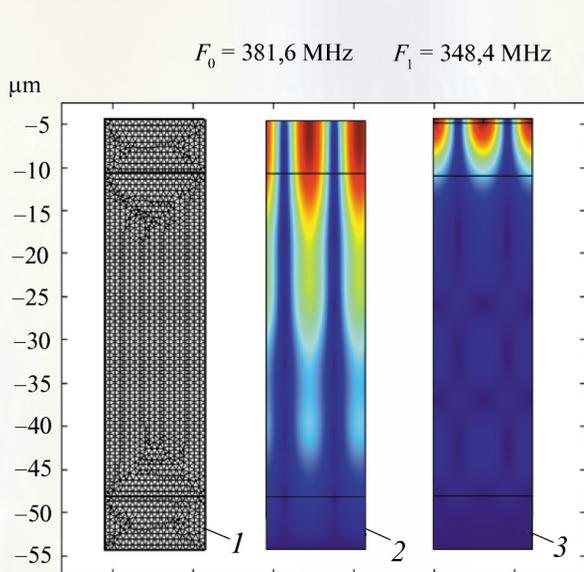


Рис. 8. Анализ МКЭ:

- 1 – расчетная сетка тестовой структуры;
- 2 – собственная частота для свободной поверхности;
- 3 – собственная частота для металлизированной поверхности с относительной толщиной алюминия $h/\lambda = 3,5\%$

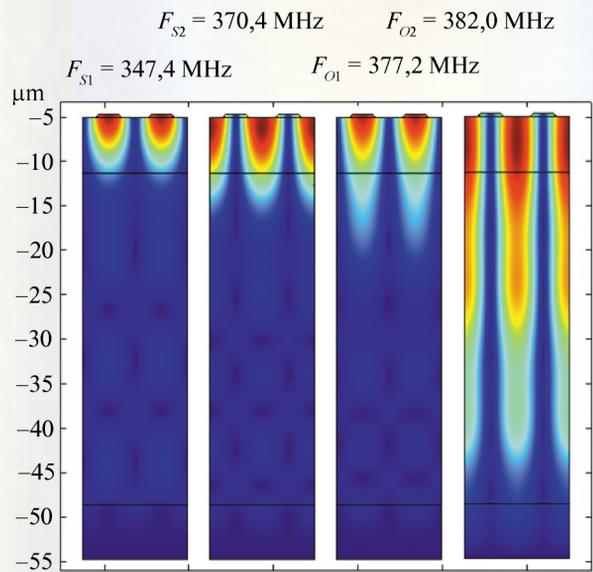
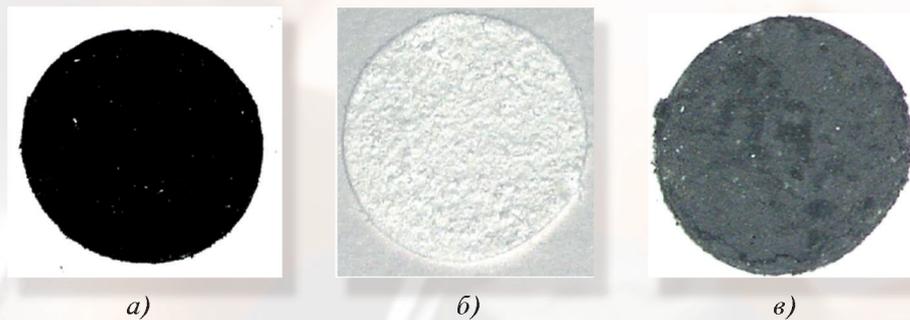


Рис. 9. Собственные частоты $F_{S1}, F_{S2}, F_{O1}, F_{O2}$ для поверхности с электродами с относительной толщиной алюминия $h/\lambda = 3,5\%$

Рисунки к статье В. В. Просянюка, Н. В. Прудникова, И. С. Суворова, Б. Ю. Паршикова, М. В. Дюбанова
«О ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНЫХ ГАЛЬВАНИЧЕСКИХ ЭЛЕМЕНТАХ РЕЗЕРВНЫХ ИСТОЧНИКОВ ТОКА НА ОСНОВЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ КОНДЕНСИРОВАННЫХ СИСТЕМ»



a) *б)* *в)*
Рис. 1. Внешний вид элементов ВГЭ:
a – катодный; *б* – электролитный; *в* – анодный

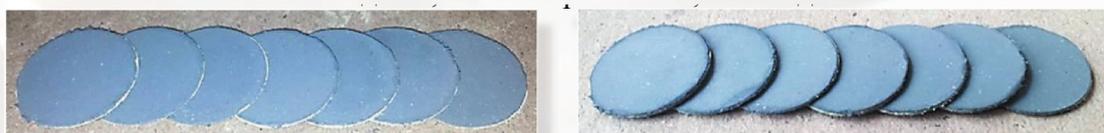
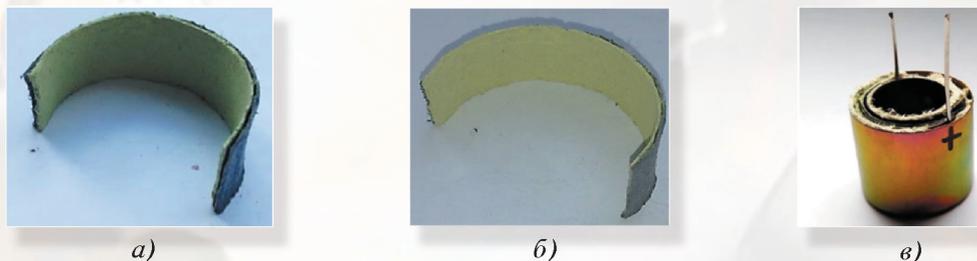


Рис. 2. Внешний вид ВГЭ



a) *б)* *в)*
Рис. 3. Внешний вид гибких ВГЭ и их батарей:
a и *б* – гибкие ВГЭ; *в* – батарея гибких ВГЭ



Рис. 4. Внешний вид современных батарей ВГЭ