



# НАНО- МИКРОСИСТЕМНАЯ ТЕХНИКА

ISSN 1813-8586

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

Том 25. № 4. 2023

Рисунки к статье А. Б. Грабова, С. А. Жуковой, В. И. Суханова  
**«РАЗРАБОТКА МЕТОДОВ СТАТИСТИЧЕСКОГО КОНТРОЛЯ ПРОЦЕССА  
 В ТЕХНОЛОГИИ АНИЗОТРОПНЫХ МАГНИТОРЕЗИСТИВНЫХ ДАТЧИКОВ»**

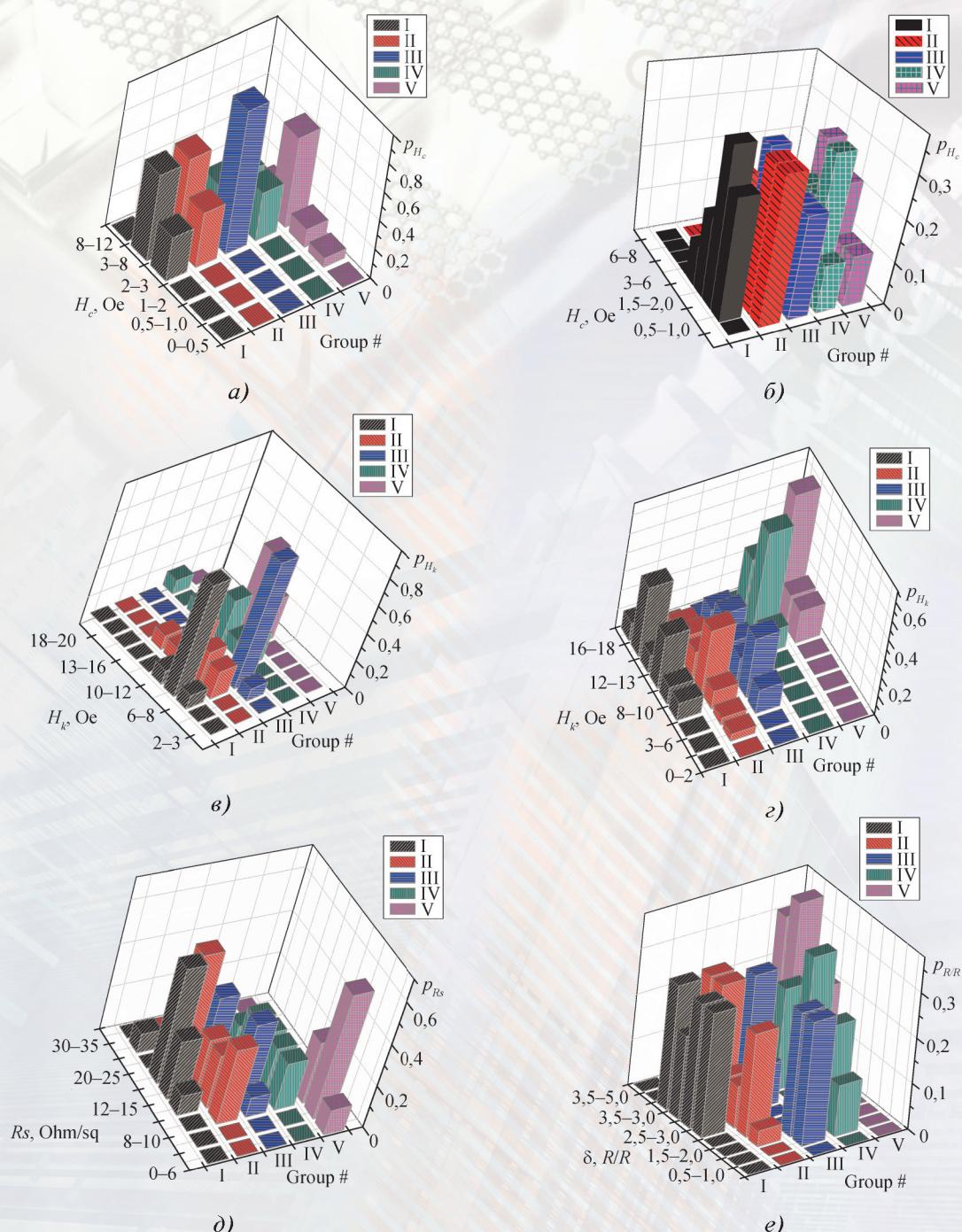


Рис. 2. Гистограммы распределения магнитных и электрических параметров тонких пленок  $\text{Ni}_{81}\text{Fe}_{19}$  в группах I–V:

*a* – коэрцитивность  $H_c$ , измерение на гистериографе; *b* – коэрцитивность  $H_c$ , измерение на 6-зондовом стенде; *c* – поле анизотропии  $H_k$ , измерение на гистериографе; *g* – поле анизотропии  $H_k$ , измерение на 6-зондовом стенде; *d* – поверхностное сопротивление  $R_s$ ; *e* – магниторезистивный эффект  $dR/R$

# НАНО- И МИКРОСИСТЕМНАЯ ТЕХНИКА

Том 25. № 4 ◆ 2023

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 научных и научно-технических изданий ВАК России по научным специальностям 1.3.11. — Физика полупроводников (физ.-мат., техн.), 2.2.2. — Электронная компонентная база микро- и наноэлектроники, квантовых устройств (физ.-мат., техн.).

2.2.3. — Технология и оборудование для производства материалов и приборов электронной техники (техн.), 2.2.9. — Проектирование и технология приборостроения и радиоэлектронной аппаратуры (техн.), 1.4.15. — Химия твердого тела (хим., техн., физ.-мат.).

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

Горнев Е. С., д.т.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

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

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

## Редакционная коллегия:

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

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

Астахов М. В., д.х.н., проф.

Бакланов М. Р., д.х.н., проф. (Китай)

Басаев А. С., к.ф.-м.н.

Васильев А. А., д.т.н.

Викулин В. В., к.х.н., д.т.н., проф.

Дайнеко А. В., к.ф.-м.н.

Кальнов В. А., к.т.н.

Карякин А. А., д.х.н., проф.

Кузнецов Е. В., д.т.н., проф.

Леонович Г. И., д.т.н., проф.

Панич А. Е., д.т.н., проф.

Пожела К., д.ф.-м.н. (Литва)

Рыжий М. В., Ph.D, проф. (Япония)

Сантос Э. Х. П., Ph.D, Ful. Prof. (Бразилия)

Сингх К., к.т.н. (Индия)

Телец В. А., д.т.н., проф.

Тимошенков С. П., д.т.н., проф.

Хабибуллин Р. А., к.ф.-м.н., доц.

Шубарев В. А., д.т.н., проф.

## Редакция:

Антонов Б. И. (директор изд-ва)

Лысенко А. В. (отв. секретарь)

Чугунова А. В. (науч. ред.)

Щетинкин Д. А. (сайт)

## СОДЕРЖАНИЕ

### МАТЕРИАЛОВЕДЧЕСКИЕ И ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ МНСТ

Печерская Е. А., Зинченко Т. О., Голубков П. Е., Карпанин О. В., Гурин С. А., Новичков М. Д. Анализ влияния технологических параметров на свойства прозрачных проводящих оксидов . . . . . 151

Соловьев В. А., Пронин И. А., Мишкин В. П., Карманов А. А., Якушова Н. Д., Нищев К. Н. Морфологический контроль тонких диэлектрических пленок, полученных магнетронным ВЧ-распылением и термическим испарением в вакууме . . . . . 159

Грабов А. Б., Жукова С. А., Суханов В. И. Разработка методов статистического контроля процесса в технологии анизотропных магниторезистивных датчиков . . . . . 165

Ефимов А. С., Темнов А. М., Зайцев А. А., Королькова Д. Д., Пашков А. Н., Есипова Т. М., Шарапов Н. А., Дудинов К. В., Курочка А. С., Белов Р. Г. Система Au—Sn для монтажа кристаллов на пластине в микроэлектронике СВЧ методом взаимной переходной диффузии . . . . . 171

### МОДЕЛИРОВАНИЕ И КОНСТРУИРОВАНИЕ МНСТ

Койгеров А. С. Теоретические особенности применения модифицированной модели связанных мод и ее формализации на основе Р-матриц при расчете частотных характеристик фильтров на ПАВ . . . . . 181

### ЭЛЕМЕНТЫ МНСТ

Адамович Д. С., Айвазян В. М., Хмельницкий И. К., Лучинин В. В., Парфенович С. Е., Орехов Ю. Д., Карелин А. М., Холодкова Е. Е. Управление манипулятором с помощью сенсорной перчатки на основе ионных электроактивных полимеров . . . . . 189

### ПРИМЕНЕНИЕ МНСТ. РАДИОФОТОНИКА

Белкин М. Е. Радиофотонный подход в разработке нового поколения СВЧ радиоэлектронных устройств и систем . . . . . 195

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. 8(499) 270-16-52)

### Адрес для переписки:

107076, Москва,

ул. Матросская Тишина,

д. 23, стр. 2, оф. 45

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. 25  
No. 4  
2023

## 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  
 Gornev E. S., Dr. Sci. (Tech.), Prof., Cor.-Mem. RAS  
 Kuljchin Yu. N., Dr. Sci. (Phys.-Math.), Prof., Acad. RAS  
 Labunov V. A. (Belorussia), Sci. (Tech.), Acad. NASB  
 Narajkin O. S., Dr. Sci. (Tech.), Prof., Cor.-Mem. RAS  
 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., Dr. Sci. (Phys.-Math.), Prof. (Belorussia)  
 Andreev A., Cand. Sci. (Phys.-Math.), Prof. (UK)  
 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. (Phys.-Math.)  
 Kalnov V. A., Cand. Sci. (Tech.)  
 Karjakin A. A., Dr. Sci. (Chem.), Prof.  
 Khabibullin R. A., Cand. Sci. (Phys.-Math.), Ass. Prof.  
 Kuznetsov E. V., Dr. Sci. (Tech.), Prof.  
 Leonovich G. I., Dr. Sci. (Tech.), Prof.  
 Panich A. E., Dr. Sci. (Tech.), Prof.  
 Pozhela K., Dr. Sci. (Phys.-Math.) (Lithuania)  
 Ryzhii M. V., Ph. D., Prof. (Japan)  
 Santos E. J. P., Ph. D., Prof. (Brasil)  
 Shubarev V. A., Dr. Sci. (Tech.), Prof.  
 Singh K., PhD (India)  
 Telets V. A., Dr. Sci. (Tech.), Prof.  
 Timoshenkov S. P., Dr. Sci. (Tech.), Prof.  
 Vasiliev A. A., 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

### SCIENCE OF MATERIALS AND TECHNOLOGICAL BASICS OF MNST

Pecherskaya E. A., Zinchenko T. O., Golubkov P. E., Karpanin O. V., Gurin S. A., Novichkov M. D. Analysis of the Effect of Technological Parameters on the Properties of Transparent Conductive Oxides . . . . . 151

Solovyov V. A., Pronin I. A., Mishkin V. P., Karmanov A. A., Yakushova N. D., Nishchev K. N. Morphological Control of thin Dielectric Films Obtained by RF Magnetron Sputtering and Thermal Evaporation in Vacuum . . . . . 159

Grabov A. B., Zhukova S. A., Sukhanov V. I. Development of Statistical Process Control Methods for Anisotropic Magnetoresistive Sensor Technology . . . . . 165

Efimov A. S., Temnov A. M., Zaycev A. A., Korolkova D. D., Pashkov A. N., Esipova T. M., Sharapov N. A., Dudinov K. V., Kurochka A. S., Belov R. G. Wafer-Level Au—Sn Solid-Liquid Interdiffusion Bonding for Microwave Applications . . . . . 171

### MODELLING AND DESIGNING OF MNST

Koigerov A. S. Theoretical Features of the Application of Modified Coupling of Modes Model and its Formalization Based on P-Matrices for Calculating the Frequency Responses of SAW filters . . . . . 181

### MICRO- AND NANOSYSTEM TECHNIQUE ELEMENTS

Adamovich D. S., Aivazyan V. M., Khmelnitskiy I. K., Luchinin V. V., Parfenovich S. E., Orekhov Yu. D., Karelina A. M., Kholodkova E. E. Manipulator Control Using a Sensor Glove Based on Ionic Electroactive Polymers . . . . . 189

### APPLICATION OF MNST. MICROWAVE-PHOTONICS

Belkin M. E. Microwave-Photonics Approach in Developing a New Generation of Microwave-Electronics Devices and Systems . . . . . 195

Web: [www.microsystems.ru/eng/](http://www.microsystems.ru/eng/); e-mail: nmst@novtex.ru

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

УДК 684.04.05

DOI: 10.17587/nmst.25.151-158

Е. А. Печерская, д-р техн. наук, проф., зав. каф., e-mail: peal@list.ru,  
Т. О. Зинченко, инженер-исследователь каф., e-mail: scar0243@gmail.com,  
П. Е. Голубков, доцент каф., e-mail: golpavpnz@yandex.ru,  
О. В. Карпанин, зав. службой калибровки и ремонта, e-mail: karpanino@mail.ru,  
С. А. Гурин, канд. техн. наук, ст. науч. сотрудник кафедры, e-mail: teslananoel@rambler.ru,  
М. Д. Новичков, аспирант, e-mail: novichkov1998maks@gmail.com

Кафедра "Информационно-измерительная техника и метрология" Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования "Пензенский государственный университет", г. Пенза

## АНАЛИЗ ВЛИЯНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ НА СВОЙСТВА ПРОЗРАЧНЫХ ПРОВОДЯЩИХ ОКСИДОВ

Поступила в редакцию 09.03.2023

Разработана модель в виде ориентированного графа, отображающая взаимосвязь технологических режимов и параметров качества прозрачных проводящих покрытий. Это позволило систематизировать влияющие факторы и предложить аналитическое описание воздействующих параметров, реакций на них и свойств синтезируемых покрытий в виде системы дифференциальных уравнений. На основе указанной математической модели взаимосвязи технологических режимов и свойств покрытий разработана методика выбора оптимальных технологических параметров в целях получения прозрачных проводящих покрытий с заданными свойствами. Достигнутые результаты целесообразно использовать в технологических процессах синтеза прозрачных проводящих покрытий с заданными свойствами.

**Ключевые слова:** прозрачный проводящий оксид, технологический режим, параметры, ориентированный граф, аналитическая модель, поверхностное сопротивление, корреляционный анализ

### Введение

На современном этапе развития технологий актуальна задача синтеза прозрачных проводящих покрытий с заданными свойствами в целях их применения в солнечных элементах, элементах функциональной электроники, "умных" стеклах [1]. Однако отсутствие системного формализованного описания взаимосвязей между свойствами прозрачных проводящих слоев и влияющими на них технологическими режимами в зависимости от используемых материалов, методов нанесения обуславливает проблему управляемого синтеза функциональных слоев солнечных элементов, имеющих оптимальную структуру для достижения

наибольшего значения коэффициента полезного действия (КПД). Многие научные коллективы [2–6] занимаются исследованием фотоэлектродов в целях повышения эффективности СЭ [7]. Например, для увеличения КПД посредством мультинаправленного переноса фотоэлектронов изобретены модификации нанотрубок  $TiO_2$  [8–12]. Увеличению фототока также способствует добавление оксидов металлов в тонкую пленку  $TiO_2$  [13, 14]. Однако традиционные методы получения тонких пленок имеют ряд недостатков: использование вакуума (повышает стоимость); ограничение по площади нанесения (ограничивает нанесение пленок на поверхности большой формы), сложность при встраивании в производство [15]. Установ-

лено, что перспективным методом является спрей-пиролиз, который позволяет получать пленки должного качества без использования вакуума. Однако для эффективного использования метода спрей-пиролиза необходим учет ряда параметров, а именно влияние технологических режимов на качество прозрачных проводящих покрытий, а также контроль необходимых значений электрофизических, оптических параметров структур [16]. Структурные параметры прозрачных проводящих оксидов (ППО) подробно описаны в работе [17], оптические параметры — в работах [18, 19], электрофизические — в [20]. Результаты исследований влияния технологических режимов на параметры прозрачных проводящих оксидов часто отражаются в научных статьях, но, как правило, представляют собой зависимости параметров либо от температуры [21—23], либо от концентрации примеси [24, 25]. То есть имеющиеся в мире на данный момент исследования не охватывают комплексно анализ воздействия всех влияющих факторов в совокупности на параметры прозрачных проводящих оксидов, что является серьезной научной проблемой. Ее решению способствует разработка моделей взаимосвязи разнородных параметров и свойств прозрачных проводящих покрытий.

## 1. Модель в виде ориентированного графа

Взаимосвязи совокупности факторов, от которых зависят свойства и параметры качества прозрачных проводящих покрытий, представлены в виде разработанного ориентированного графа (рис. 1).

Модель отображает в виде вершин графа параметры, которые подразделяются на технологические и параметры, характеризующие качество прозрачных

проводящих покрытий. Дуги, соединяющие вершины, отображают свойства покрытий, причем стрелки дуг указывают направление от параметра-воздействия к параметру-реакции.

Параметры-воздействия можно распределить между двумя категориями: параметрами технологического процесса и параметрами раствора. Параметры технологического процесса синтеза:  $l$  — расстояние между подложкой и распылителем;  $t$  — время распыления;  $T$  — температура пиролиза;  $v$  — скорость распыления;  $P$  — давление в распылителе. Параметры, используемые при подготовке раствора:  $V$  — объем раствора и  $\chi$  — концентрация примеси. Также необходимо учитывать диэлектрическую проницаемость материала  $\epsilon$  на высоких частотах.

К параметрам-реакциям относятся параметры, характеризующие качество синтезируемых покрытий:  $D$  — коэффициент пропускания прозрачной проводящей пленки;  $R$  — ее поверхностное сопротивление.

Следует отметить, что ряд параметров зависит от определенных факторов и в то же время оказывает влияние на другие параметры технологического процесса. Эти параметры выступают в качестве и воздействий, и реакций. Полная графовая модель содержит 28 вершин и 74 дуги. На рис. 1 представлена упрощенная графовая модель, описывающая взаимосвязи между параметрами-воздействиями и реакциями. Эта модель учитывает влияние только тех параметров-воздействий, которые оказывают наибольшее влияние на такие параметры качества покрытий, как их поверхностное сопротивление, равномерность покрытий, толщину, прозрачность, показатель преломления, изотропность, коэффициент поглощения, подвижность и концентрация носителей зарядов.

Взаимосвязи множеств параметров-воздействий и параметров-реакций метода спрей-пиролиза представлены на диаграмме Венна (рис. 2).

При разработке диаграммы Венна введены следующие обозначения:  $R$  — множество параметров-реакций;  $V$  — множество параметров воздействующих факторов. Множество параметров, относящихся одновременно к обеим категориям, обозначено  $VR$ :

$$VR = V \cap R = \{x | x \in V \wedge x \in R\}, \quad (1)$$

где  $x$  — элементы множеств.

В рассматриваемом случае

$$V = \{T, \eta, \rho, n_k, \chi, l, t, J, \mu, n, Ef, d, L, \varepsilon f, c, \omega, \tau, p, V, v, P, \epsilon, Eg, K\}; \quad (2)$$

$$R = \{D, \omega, \tau, p, Eg, R, J, d, L, \varepsilon f, \eta, \rho, n_k, c, \mu, n, Ef, K\}; \quad (3)$$

$$VR = \{J, \mu, n, Ef, d, L, \varepsilon f, \eta, \rho, n_k, c, \omega, \tau, p, Eg, K\}. \quad (4)$$

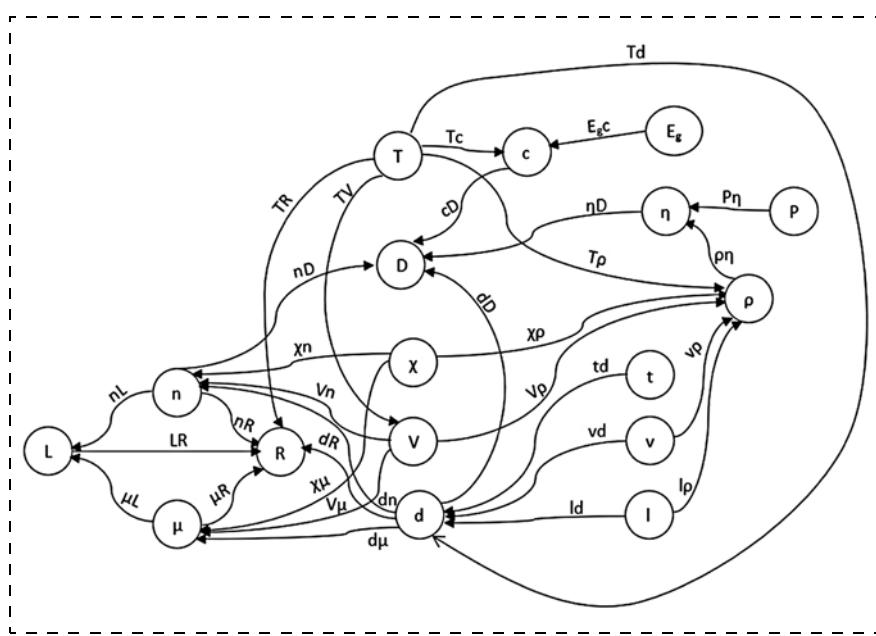


Рис. 1. Взаимосвязи между свойствами прозрачных проводящих покрытий и технологическими режимами метода спрей-пиролиза

Таблица 1

**Взаимосвязи между параметрами синтеза прозрачных проводящих оксидов и их свойствами**

Свойство	Математическое описание	Свойство	Математическое описание	Свойство	Математическое описание
$E_{gc}$	$E_{gc} = \frac{\partial c}{\partial E_g}$	$\chi d$	$\chi d = \frac{\partial d}{\partial \chi}$	$P_p$	$P_p = \frac{\partial p}{\partial P}$
$JR$	$JR = \frac{\partial R}{\partial J}$	$td$	$td = \frac{\partial d}{\partial t}$	$v_p$	$v_p = \frac{\partial p}{\partial v}$
$TR$	$TR = \frac{\partial R}{\partial T}$	$ld$	$ld = \frac{\partial d}{\partial l}$	$V_p$	$V_p = \frac{\partial p}{\partial V}$
$nR$	$nR = \frac{\partial R}{\partial n}$	$K\eta$	$K\eta = \frac{\partial \eta}{\partial K}$	$\chi\rho$	$\chi\rho = \frac{\partial \rho}{\partial \chi}$
$\mu R$	$\mu R = \frac{\partial R}{\partial \mu}$	$\rho\eta$	$\rho\eta = \frac{\partial \eta}{\partial \rho}$	$T_p$	$T_p = \frac{\partial p}{\partial T}$
$E_f R$	$E_f R = \frac{\partial R}{\partial E_f}$	$P\eta$	$P\eta = \frac{\partial \eta}{\partial P}$	$l_p$	$l_p = \frac{\partial p}{\partial l}$
$dR$	$dR = \frac{\partial R}{\partial d}$	$n_k\eta$	$n_k\eta = \frac{\partial \eta}{\partial n_k}$	$v_p$	$v_p = \frac{\partial p}{\partial v}$
$LR$	$LR = \frac{\partial R}{\partial L}$	$dD$	$dD = \frac{\partial D}{\partial d}$	$\chi A$	$\chi A = \frac{\partial A}{\partial \chi}$
$\varepsilon f R$	$\varepsilon f R = \frac{\partial R}{\partial \varepsilon f}$	$KD$	$KD = \frac{\partial D}{\partial K}$	$nE_f$	$nE_f = \frac{\partial E_f}{\partial n}$
$KR$	$KR = \frac{\partial R}{\partial K}$	$nD$	$nD = \frac{\partial D}{\partial n}$	$\mu L$	$\mu L = \frac{\partial L}{\partial \mu}$
$bR$	$bR = \frac{\partial R}{\partial b}$	$\eta D$	$\eta D = \frac{\partial D}{\partial \eta}$	$nL$	$nL = \frac{\partial L}{\partial n}$
$\chi n$	$\chi n = \frac{\partial n}{\partial \chi}$	$cD$	$cD = \frac{\partial D}{\partial c}$	$dE_g$	$dE_g = \frac{\partial E_g}{\partial d}$
$V_n$	$V_n = \frac{\partial n}{\partial V}$	$T_c$	$T_c = \frac{\partial c}{\partial T}$	$n\tau$	$n\tau = \frac{\partial \tau}{\partial n}$
$dn$	$dn = \frac{\partial n}{\partial d}$	$A_c$	$A_c = \frac{\partial c}{\partial A}$	$\chi\tau$	$\chi\tau = \frac{\partial \tau}{\partial \chi}$
$\chi\mu$	$\chi\mu = \frac{\partial \mu}{\partial \chi}$	$\eta n_k$	$\eta n_k = \frac{\partial n_k}{\partial \eta}$	$\mu\tau$	$\mu\tau = \frac{\partial \tau}{\partial \mu}$
$V_\mu$	$V_\mu = \frac{\partial \mu}{\partial V}$	$\varepsilon f n_k$	$\varepsilon f n_k = \frac{\partial n_k}{\partial \varepsilon f}$	$K\tau$	$K\tau = \frac{\partial \tau}{\partial K}$
$d\mu$	$d\mu = \frac{\partial \mu}{\partial d}$	$Egn_k$	$Egn_k = \frac{\partial n_k}{\partial E_g}$	$d\tau$	$d\tau = \frac{\partial \tau}{\partial d}$
$b\mu$	$b\mu = \frac{\partial \mu}{\partial b}$	$V_p$	$V_p = \frac{\partial p}{\partial V}$	$TK$	$TK = \frac{\partial K}{\partial T}$
$\varepsilon \varepsilon f$	$\varepsilon \varepsilon f = \frac{\partial \varepsilon f}{\partial \varepsilon}$	$\chi p$	$\chi p = \frac{\partial p}{\partial \chi}$	$\chi K$	$\chi K = \frac{\partial K}{\partial \chi}$
$\tau \varepsilon f$	$\tau \varepsilon f = \frac{\partial \varepsilon f}{\partial \tau}$	$dp$	$dp = \frac{\partial p}{\partial d}$	$VK$	$VK = \frac{\partial K}{\partial V}$
$\omega \varepsilon f$	$\omega \varepsilon f = \frac{\partial \varepsilon f}{\partial \omega}$	$bp$	$bp = \frac{\partial p}{\partial b}$	$tK$	$tK = \frac{\partial K}{\partial t}$
$Vd$	$Vd = \frac{\partial d}{\partial V}$	$T_p$	$T_p = \frac{\partial p}{\partial T}$	$vK$	$vK = \frac{\partial K}{\partial v}$
$vd$	$vd = \frac{\partial d}{\partial v}$	$l_p$	$l_p = \frac{\partial p}{\partial l}$	$n\omega$	$n\omega = \frac{\partial \omega}{\partial n}$
$Td$	$Td = \frac{\partial d}{\partial T}$	$tp$	$tp = \frac{\partial p}{\partial t}$	$\varepsilon\omega$	$\varepsilon\omega = \frac{\partial \omega}{\partial \varepsilon}$
$pd$	$pd = \frac{\partial d}{\partial p}$				

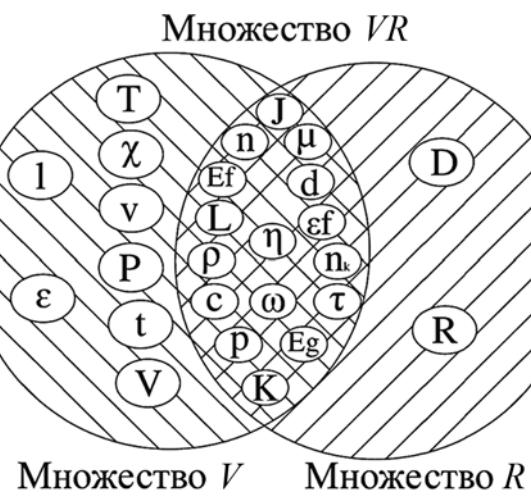


Рис. 2. Диаграмма Венна, отображающая множество параметров-воздействий и параметров-реакций метода спрей-пиролиза

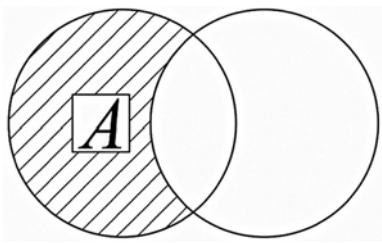


Рис. 3. Множество параметров, не относящихся к множеству параметров-реакций

Множество параметров, не относящихся к множеству параметров-реакций, может быть представлено в виде множества  $A$  (рис. 3):

$$A = \{\varepsilon, t, \chi, v, P, T, I, V\}. \quad (5)$$

Обозначение множества  $A$  может быть найдено как разность соответствующих множеств согласно следующему выражению:

$$A = V/VR = \{x | x \in V \text{ и } x \notin VR\}. \quad (6)$$

Математическое описание свойств прозрачных проводящих покрытий представлено в табл. 1.

## 2. Аналитическая модель взаимосвязи технологических параметров и свойств прозрачных проводящих оксидов

На основе модели в виде ориентированного графа (см. рис. 1) разработана аналитическая модель взаимосвязи параметров технологического процесса синтеза ППО и свойств полученных покрытий. Аналисти-

ческая модель представляет собой следующую систему уравнений:

$$\begin{aligned}
 \partial R &= JR \partial J + TR \partial T + nR \partial n + \mu R \partial \mu + EfR \partial Ef + \\
 &+ dR \partial d + LR \partial L + \varepsilon fR \partial \varepsilon f + KR \partial K + bR \partial b; \\
 \partial n &= \chi n \partial \chi + Vn \partial V + dn \partial d; \\
 \partial \mu &= \chi \mu \partial \chi + V\mu \partial V + d\mu \partial d + b\mu \partial b; \\
 \partial \varepsilon f &= \varepsilon \varepsilon f \partial \varepsilon + \tau \varepsilon f \partial \tau + \omega \varepsilon f \partial \omega; \\
 \partial d &= Vd \partial V + vd \partial v + Td \partial T + pd \partial p + \chi d \partial \chi + \\
 &+ td \partial t + ld \partial l; \\
 \partial \eta &= K\eta \partial K + \rho \eta \partial \rho + P\eta \partial p + n_k \eta \partial h_k; \\
 \partial D &= dd \partial d + KD \partial K + nD \partial n + \eta D \partial \eta + cD \partial c; \\
 \partial c &= Tc \partial T + Ac \partial A + Egc \partial Eg; \\
 \partial p &= Vp \partial V + \chi p \partial \chi + dp \partial d + bp \partial b + Tp \partial T + \\
 &+ lp \partial l + tp \partial t + Pp \partial P + vp \partial v; \\
 \partial \rho &= V\rho \partial V + \chi \rho \partial \chi + T\rho \partial T + lp \partial l + vp \partial v; \\
 \partial J &= TJ \partial T + LJ \partial L + vJ \partial v + pJ \partial p; \\
 \partial \tau &= n\tau \partial n + \chi \tau \partial \chi + \mu \tau \partial \mu + K\tau \partial K + vK \partial v; \\
 \partial \omega &= n\omega \partial n + \varepsilon \omega \partial \varepsilon, \\
 \partial n_k &= \eta n_k \partial \eta + \varepsilon f n_k \partial \varepsilon f + Egn_k \partial Eg; \\
 \partial L &= nL \partial n + \mu L \partial \mu; \\
 \partial Eg &= dEg \partial d; \\
 \partial Ef &= nEf \partial n; \\
 \partial A &= \chi A \partial \chi.
 \end{aligned} \tag{7}$$

Система (7) содержит 19 уравнений, которые характеризуются отношениями приращений параметров-реакций к параметрам-воздействиям. Значения реакций при конкретных значениях параметров — реакций определяют в процессе экспериментов при фиксации всех других параметров.

Например, на сопротивление  $R$  согласно первому уравнению системы (7), оказывают влияние параметры:  $J$ ,  $n$  и  $\mu$ ,  $Ef$ ,  $d$ ,  $L$ ,  $b$ ,  $K$ ,  $\varepsilon f$ . В свою очередь, на указанные параметры также оказывают влияние факторы, которые присутствуют в левой части уравнений системы (7), т. е. сами являются реакциями на другие воздействия. Следовательно, в случае решения систе-

мы уравнений при определении конкретных частных производных, присутствующих справа в уравнениях, необходимо обеспечить стабилизацию всех других параметров, кроме тех, которые присутствуют при определении данных частных производных. Например, при определении свойства  $TR = \partial R / \partial T$  согласно первому уравнению системы (7) необходимо стабилизировать  $n$ ,  $\mu$ ,  $J$ ,  $Ef$ ,  $d$ ,  $L$ ,  $\varepsilon f$ ,  $K$ ,  $b$ .

Детальный анализ процесса спрей-пиролиза показал [1, 16, 24], что температура  $T$ , концентрация примеси  $\chi$  и объем раствора  $V$  существенно по сравнению с другими параметрами влияют на параметры качества ППО.

Обработка результатов экспериментальных исследований зависимостей параметров ППО от температуры, концентрации примеси и объема раствора проведена в пакете программ *STATGRAPHICS*. Целью обработки экспериментальных данных является получение математических моделей взаимосвязей физических величин в процессе синтеза ППО. Обработку данных проводили с помощью корреляционного и регрессионного анализа, что соответствует первому и второму этапу, соответственно.

Во время первого этапа по абсолютному значению коэффициента корреляции выявлялось наличие корреляции между параметрами процесса спрей-пиролиза и, при ее наличии, тип корреляции. Корреляционный анализ показал, что во всех случаях модуль коэффициента корреляции позволяет практически рассматривать исследуемые зависимости.

Во время второго этапа получены аналитические математические модели исследуемых корреляционных связей в форме уравнений регрессии. Экспоненциальное уравнение принято единой формой уравнения регрессии для описания взаимосвязей процесса синтеза ППО. Например, в табл. 2 представлены в виде регрессионных уравнений функциональные зависимости параметра-реакции подвижности носителей заряда от параметров-воздействий (концентрации примеси, объема раствора, толщины покрытия, концентрации носителей заряда) при других фиксированных параметрах.

Таблица 2

Регрессионные уравнения зависимостей параметров-реакций от параметров воздействий спрей-пиролиза

Параметр-реакция	Параметр-воздействие	Фиксированный параметр	Значение фиксированного параметра	Уравнение регрессии	Коэффициент корреляции
Подвижность носителей заряда $M$ , $\text{см}^2/(\text{B} \cdot \text{с})$	Концентрация примеси $x$ , %	Объем раствора, мл	16	$M = \exp(2,01969 + 1,55877x)$	0,383229
Подвижность носителей заряда $M$ , $\text{см}^2/(\text{B} \cdot \text{с})$	Объем раствора $V$ , мл	Концентрация примеси, %	16	$M = \exp(2,4322 - 0,0226851V)$	-0,343492
Подвижность носителей заряда $M$ , $\text{см}^2/(\text{B} \cdot \text{с})$	Толщина покрытия $d$ , нм	Концентрация носителей заряда, $\text{см}^{-3}$	16	$M = \exp(2,84884 - 0,00306435d)$	-0,42242
Подвижность носителей заряда $M$ , $\text{см}^2/(\text{B} \cdot \text{с})$	Концентрация носителей заряда $n$ , $\text{см}^{-3}$	Толщина покрытия, нм	16	$M = \exp(2,37076 - 0,00282679n)$	-0,576789

### 3. Методика выбора оптимальных технологических параметров

Подбор оптимальных технологических параметров выполнен графоаналитическим методом. Для этого в качестве определяемого свойства использована концентрация носителей заряда. Первым показателем, влияющим на эту характеристику, является концентрация примеси, в данном случае — сурьмы [21]. За необходимое значение принято  $n = 4,8 \cdot 10^{20} \text{ см}^{-3}$ . В этом случае, исходя из полученных зависимостей (рис. 4), имеется несколько альтернативных вариантов технологических параметров с концентрациями примеси 0,023, 0,025 и 0,027 %, что соответствует кривым 1, 2, 3.

Добавление легирующей примеси увеличивает объемную концентрацию. Сурьма характеризуется двумя основными состояниями:  $\text{Sb}^{5+}$  и  $\text{Sb}^{3+}$ . Если в качестве легирующей примеси используется сурьма ( $\text{Sb}^{5+}$ ), ее атомы заменяют атомы олова ( $\text{Sn}^{+4}$ ). Как следствие, сурьма является донором, и происходит процесс появления избыточного числа электронов.

Концентрации носителей заряда  $n = 4,8 \cdot 10^{20}$  соответствуют два варианта концентрации примеси: 0,025 %; 0,027 %.

Вторым технологическим параметром, влияющим на концентрацию носителей заряда, является объем раствора. На рис. 5 показана экспериментально полученная зависимость концентрации носителей заряда  $n$  от объема раствора  $V$ , равного 8, 10, 12 мл (кривые 1, 2, 3 соответственно). Это объясняется тем, что происходит рост толщины вследствие увеличения объема раствора. Чем тоньше покрытие, тем меньше число свободных электронов. Это иллюстрирует рис. 6, на котором приведена зависимость концентрации носителей заряда  $n$  от толщины покрытия  $d$ .

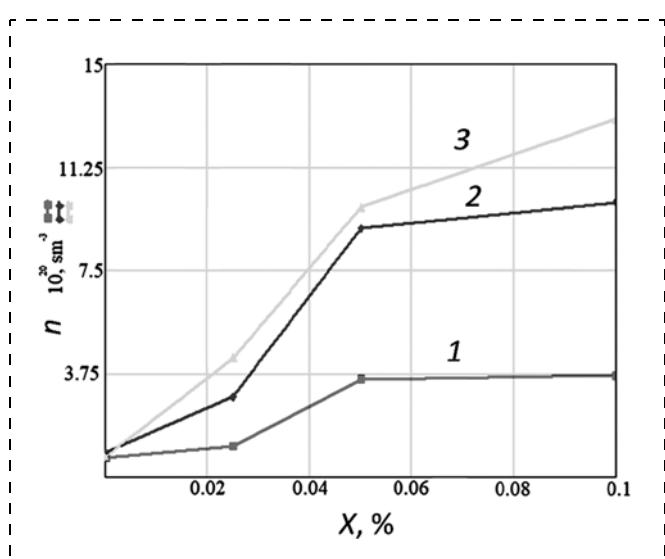


Рис. 4. Зависимость концентрации носителей заряда  $n$  от концентрации примесей  $X$

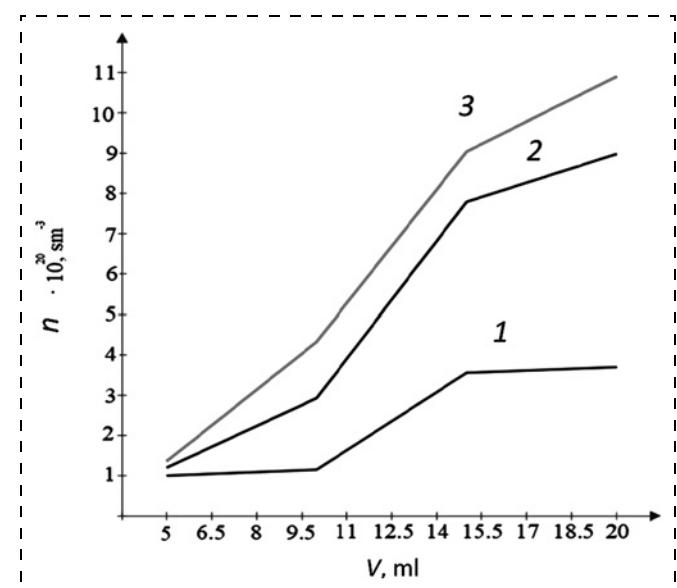


Рис. 5. Зависимость концентрации носителей заряда  $n$  от объема раствора  $V$

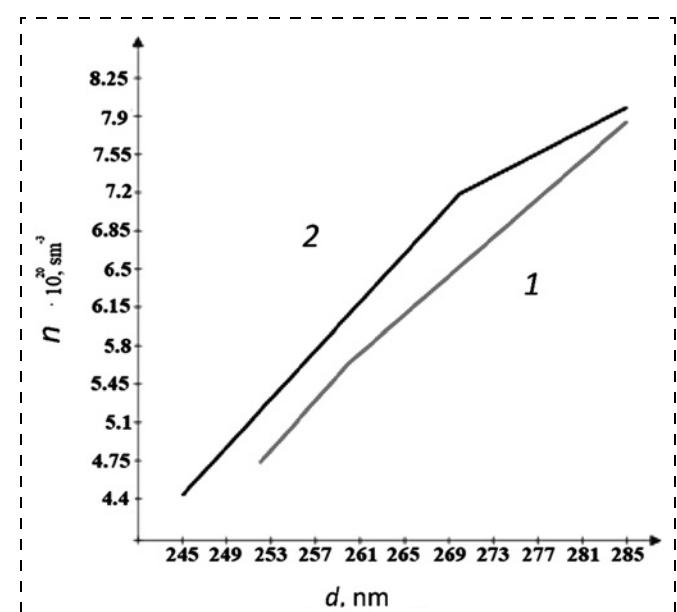


Рис. 6. Зависимость концентрации носителей заряда  $n$  от толщины  $d$

Концентрации носителей заряда  $n = 4,8 \cdot 10^{20} \text{ см}^{-3}$  соответствует:

- объем раствора 10 мл;
- объем раствора 12 мл.

Концентрация носителей заряда  $n = 4,8 \cdot 10^{20} \text{ см}^{-3}$  соответствует толщине покрытия 248 нм (кривая 2) или 253 нм (кривая 1).

В результате получены два альтернативных варианта технологических режимов:

- вариант 1: концентрация примеси 0,027 %, объем раствора 12 мл, толщина покрытия 253 нм;
- вариант 2: концентрация примеси 0,025 %, объем раствора 10 мл, толщина покрытия 248 нм.

## Список литературы

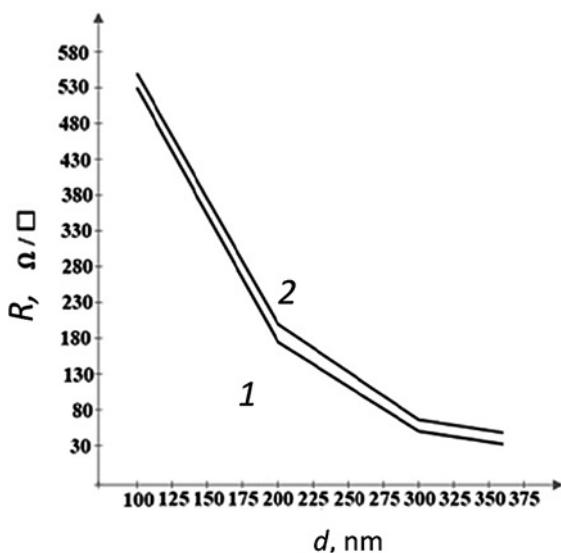


Рис. 7. Зависимость поверхностного сопротивления  $R$  от толщины  $d$

Чтобы выбрать один из вариантов, необходимо оценить поверхностное сопротивление  $R$  в зависимости от толщины  $d$  для обоих вариантов (рис. 7).

Графики, представленные на рис. 7 подтверждают, что сопротивление ниже для варианта 1.

## Заключение

Анализ факторов, влияющих на поверхностное сопротивление покрытий, показал, что концентрация носителей заряда существенно зависит от объема и концентрации примесей. В свою очередь, по мере увеличения концентрации носителей заряда проводимость увеличивается. Например, если легирование происходит с помощью сурьмы, то она занимает место вместо олова в кристаллической решетке. Также атомы примеси — это доноры в покрытии, и вследствие этого создается избыточное количество свободных носителей и происходит рост концентрации электронов. Уменьшение проводимости (при достижении конкретной концентрации примеси) связано с тем, что лишние атомы сурьмы встраиваются в межзельевые расстояния решетки и, как правило, происходит нарушение структуры.

Соответственно, технологические режимы получения покрытия с заданным параметром концентрации определяют согласно разработанному способу получения покрытий. Используя аналитическую модель в виде системы уравнений (6), можно выбирать технологические режимы для конкретных параметров прозрачного проводящего оксида.

Работа выполнена при поддержке Российской научного фонда (грант РНФ 23-29-00343).

1. Zinchenko T., Pecherskaya E., Gurin S., Kozlov G., Zhurina A., Shepeleva A. Synthesis of thin-film layers of electrochromic panels based on  $\text{SnO}_2$  and  $\text{WO}_3$  by aerosol pyrolysis // Journal of Physics: Conference Series. 2022. Vol. 2373 (3), 032019.

2. Martinson A. B.F., Elam J. W., Hupp J. T., Pellin M. J.  $\text{ZnO}$  nanotube based dyesensitized solar cells // NanoLetters. 2007. Vol. 7, N. 8. P. 2183–2187.

3. Schlur L., Carton A., Le'veque P., Guillon D., Pourroy G. Optimization of a new  $\text{ZnO}$  nanorods hydrothermal synthesis method for solid state dye sensitized solar cells applications // The Journal of Physical Chemistry C. 2013. Vol. 117, N. 6. P. 2993–3001.

4. Ameen S., Akhtar M. S., Song M., Shin H. S. Vertically aligned  $\text{ZnO}$  nanorods on hot filament chemical vapor deposition grown graphene oxide thin film substrate: solar energy conversion // ACS Applied Material sand Interfaces. 2012. Vol. 4, N. 8. P. 4405–4412.

5. McCune M., Zhang W., Deng Y. High efficiency dye sensitized solar cells based on three-dimensional multilayered  $\text{ZnO}$  nanowire arrays with ‘caterpillarlike’ structure // Nano Letters. 2012. Vol. 12, N. 7. P. 3656–3662.

6. Guo D., Wang J., Cuietal C.  $\text{ZnO TiO}_2$  core-shell nanorod arrays with enhanced photoelectrochemical performance // SolarEnergy. 2013. Vol. 95. P. 237–245.

7. Fang X., Li Y., Zhang S., Bai L., Yuan N., Ding J. The dye adsorption optimization of  $\text{ZnO}$  nanorod-based dye-sensitized solar-cells // SolarEnergy. 2014. Vol. 105. P. 14–19.

8. Park J. H., Kim S., Bard A. J. Novel carbon-doped  $\text{TiO}_2$  nanotube arrays with high aspect ratios for efficient solar water splitting // Nano Letters. 2006. Vol. 6, N. 1. P. 24–28.

9. Macak J. M., Tsuchiya H., Ghicov A., Schmuki P. Dye sensitized anodic  $\text{TiO}_2$  nanotubes // Electrochemistry Communications. 2005. Vol. 7, N. 11. P. 1133–1137.

10. Paulose M., Shankar K., Varghese O. K., Mor G. K., Hardin B., Grimes C. A. Backside illuminated dye-sensitized solar cells based on titan nanotube array electrodes // Nanotechnology. 2006. Vol. 17, N. 5. P. 1446–1448.

11. Xiao P., Garcia B. B., Guo Q., Liu D., Cao G.  $\text{TiO}_2$  nanotube arrays fabricated by anodization in different electrolytes for biosensing // Electrochemistry Communications. 2007. Vol. 9, N. 9. P. 2441–2447.

12. Paek S.-M., Jung H., Lee Y.-J., Park N.-G., Hwang S.-J., Choy J. H. Nanostructured  $\text{TiO}_2$  films for dye-sensitized solar cells // Journal of Physics and Chemistry of Solids. 2006. Vol. 67, N. 5–6. P. 1308–1311.

13. Wang Z.-S., Huang C.-H., Huang Y.-Y., et al. A highly efficient solar cell made from a dye-modified  $\text{ZnO}$ -covered  $\text{TiO}_2$  nanoporous electrode // Chemistry of Materials. 2001. Vol. 13, N. 2. P. 678–682.

14. Мещеряков А. В., Сигаев А. П., Аверин И. А., Карманов А. А., Пронин И. А., Якушова Н. Д. Модификация адсорбционных свойств наноматериалов на основе оксида цинка и диоксида олова после дополнительной активации в плазме аргона // Нано- и микросистемная техника. 2021. Т. 23, № 4. С. 186–192.

15. Mohagheghi M. M. B., Yazdi Sh. T., Mousavi M. Transport, structural and optical properties of  $\text{SnO}_2$  transparent semiconductor thin films alloyed with chromium: carrier type conversion // Journal of Materials Science Materials in Electronics. May 2017. N. 28 (6). P. 1–8.

16. Zinchenko T. O., Pecherskaya E. A., Nikolaev K. O., Golubkov P. E., Shepeleva Y. V., Artamonov D. V. The study of the optical properties of transparent conductive oxides  $\text{SnO}_2\text{-Sb}$ , obtained by spray pyrolysis // Journal of Physics: Conference Series. 2019. N. 1410 (1), № 012090.

17. Ching—Prado E., Watson A., Miranda H. Optical and electrical properties of fluorine doped tin oxide thin film 2018 // Journal of Materials Science: Materials in Electronics. 2018. Is. 18. P. 15299–15306.

18. Haddad N., Ben Ayadi Z., Mahdhi H., Djessas K. Influence of fluorine doping on the microstructure, optical and electrical properties of  $\text{SnO}_2$  nanoparticles // Journal of Materials Science: Materials in Electronics. 2017. Vol. 28, Is. 20. P. 15457–15465.

19. Shamin A., Pecherskaya E., Nikolaev K., Zinchenko T., Shepeleva Y., Golovyashkin A. Quality Control of Technological Processes of Manufacturing Functional Solar Cells Layers Based on Hybrid Organic-Inorganic Perovskites // Prec. on 2019 International Seminar on Electron Devices Design and Production (SED), Prague, Czech Republic. 2019. P. 1–5. DOI: 10.1109/SED.2019.8798441 1–5. 10.1109/SED.2019.8798441.
20. Shewale P. S., Patil S. I., Uplane M. D. Study of structural, electrical, optical, thermoelectric and photoconductive properties of S and Al co-doped  $\text{SnO}_2$  semiconductor thin films prepared by spray pyrolysis // Semicond. Sci. Technol. 2010. Vol. 25. 15008.
21. Bagheri-Mohagheghi M.-M., Shokoh-Saremi M. The electrical, optical, structural and thermoelectrical characterization of n- and p-type cobalt-doped  $\text{SnO}_2$  transparent semiconducting films prepared by spray pyrolysis technique // Physica B. 2010. Vol. 405. P. 4205–4210.
22. Moharrami F., Bagheri-Mohagheghi M.-M., Azimi-Juybari H. Preparation of fluorine-doped tin oxide films at low substrate temperature by an advanced spray pyrolysis technique, and their characterization // Thin Solid Films. 2012. Vol. 520. P. 6503–6509.
23. Печерская Е. А., Голубков П. Е., Карпанин О. В., Артамонов Д. В., Сафонов М. И., Печерский А. В. Исследование влияния технологических параметров процесса микродугового оксидирования на свойства оксидных покрытий // Известия высших учебных заведений. Электроника. 2019. Т. 24, № 4. С. 363–369.
24. Zinchenko T. O., Pecherskaya E. A., Golubkov P. E., Listuhin V. A., Zhurina A. E., Gurin S. A. Investigation of the Properties of Transparent Conductive Oxides Produced by Aerosol Pyrolysis // Journal of Surface Investigationthis. 2022. Vol. 16 (6). P. 1315–1321.
25. Zinchenko T., Pecherskaya E., Artamonov D. The properties study of transparent conductive oxides (TCO) of tin dioxide (ATO) doped by antimony obtained by spray pyrolysis // AIMS Materials Science. 2019. Vol. 6, N. 2. P. 276–287.

---

**E. A. Pecherskaya**, D. Sc., Associate Professor, Head of the Department "Information and Measurement Technology and Metrology", e-mail: peal@list.ru,  
**T. O. Zinchenko**, Research Engineer of the Department of Information and Measurement Technology and Metrology, **P. E. Golubkov**, Associate Professor of the Department of Information and Measurement Technology and metrology, **O. V. Karpanin**, Head of the Calibration and Repair Service of the Department of Information and Measurement Technology and Metrology, **S. A. Gurin**, Ph. D., Senior Researcher of the Department of Information and Measurement Technology and Metrology, **M. D. Novichkov**, Postgraduate Student of the Department of Information and Measurement Technology and Metrology, Penza State University, Penza, 440026, Russian Federation

*Corresponding author:*

**Ekaterina A. Pecherskaya**, D. Sc., Associate Professor, Head of the Department "Information and Measurement Technology and Metrology", Penza State University, Penza, 440026, Russian Federation  
E-mail: peal@list.ru

## Analysis of the Effect of Technological Parameters on the Properties of Transparent Conductive Oxides

Received on March 09, 2023  
Accepted on April 03, 2023

*It is shown that a promising method for obtaining transparent conductive oxides is spray pyrolysis, which allows to obtain films of proper quality without the use of vacuum. For the effective use of the spray pyrolysis method in order to obtain reproducible films with specified properties, it is necessary to take into account a variety of heterogeneous technological parameters that affect the quality of transparent conductive coatings. To this end, the authors have developed a model in the form of an oriented graph that displays the relationship of technological modes and quality parameters of transparent conductive coatings. The model displays parameters in the form of graph vertices, which are divided into technological and parameters characterizing the quality of transparent conductive coatings. The arcs connecting the vertices represent the properties of the coatings, and the arrows of the arcs indicate the direction from the action property to the reaction property. This model made it possible to systematize the influencing factors and offer an analytical description of the influencing parameters, reactions to them and properties of the synthesized coatings in the form of a system of differential equations. Based on the specified mathematical model of the relationship between technological modes and coating properties, a method for selecting optimal technological parameters has been developed in order to obtain transparent conductive coatings with specified properties. The technique has been tested on the example of the synthesis of a transparent conductive film of tin dioxide doped with antimony. Analysis of the factors affecting the surface resistance of coatings showed that the concentration of charge carriers significantly depends on the volume and concentration of impurities. The results of the analysis of experimental studies of the dependences of the concentration of charge carriers on the concentration of the impurity, the volume of the solution, on the thickness, the dependence of the surface resistance of the film on the thickness are presented.*

For citation:

**Pecherskaya E. A., Zinchenko T. O., Golubkov P. E., Karpanin O. V., Gurin S. A., Novichkov M. D.** Analysis of the Effect of Technological Parameters on the Properties of Transparent Conductive Oxides, *Nano- i Mikrosistemnaya Tekhnika*, 2023, vol. 25, no. 4, pp. 151–158.

DOI: 10.17587/nmst.25.151-158

The work was Supported by the Russian Science Foundation (RSF, grant 23-29-00343).

## References

1. Zinchenko T., Pecherskaya E., Gurin S., Kozlov G., Zhurina A., Shepeleva A. Synthesis of thin-film layers of electrochromic panels based on  $\text{SnO}_2$  and  $\text{WO}_3$  by aerosol pyrolysis, *Journal of Physics: Conference Series*, 2022, vol. 2373 (3), 032019.
2. Martinson A. B. F., Elam J. W., Hupp J. T., Pellin M. J.  $\text{ZnO}$  nanotube based dyesensitized solar cells, *NanoLetters*, 2007, vol. 7, no. 8, pp. 2183–2187.
3. Schlur L., Carton A., L'ev'eque P., Guillon D., and Pourroy G. Optimization of a new  $\text{ZnO}$  nanorods hydrothermal synthesis method for solid state dye sensitized solar cells applications, *The Journal of Physical Chemistry C*, 2013, vol. 117, no. 6, pp. 2993–3001.
4. Ameen S., Akhtar M. S., Song M., Shin H. S. Vertically aligned  $\text{ZnO}$  nanorods on hot filament chemical vapor deposition grown graphene oxide thin film substrate: solar energy conversion, *ACS Applied Material sand Interfaces*, 2012, vol. 4, no. 8, pp. 4405–4412.
5. McCune M., Zhang W. and Deng Y. High efficiency dye sensitized solar cells based on three-dimensional multilayered  $\text{ZnO}$  nanowire arrays with ‘caterpillarlike’ structure, *Nano Letters*, 2012, vol. 12, no. 7, pp. 3656–3662.
6. Guo D., Wang J., Cuietal C.  $\text{ZnO}$   $\text{TiO}_2$  core-shell nanorod arrays with enhanced photoelectrochemical performance, *SolarEnergy*, 2013, vol. 95, pp. 237–245.
7. Fang X., Li Y., Zhang S., Bai L., Yuan N., Ding J. The dye adsorption optimization of  $\text{ZnO}$  nanorod-based dye-sensitized solar cells, *SolarEnergy*, 2014, vol. 105, pp. 14–19.
8. Park J. H., Kim S. and Bard A. J. Novel carbon-doped  $\text{TiO}_2$  nanotube arrays with high aspect ratios for efficient solar water splitting, *Nano Letters*, 2006, vol. 6, no. 1, pp. 24–28.
9. Macak J. M., Tsuchiya H., Ghicov A. and Schmuki P. Dye sensitized anodic  $\text{TiO}_2$  nanotubes, *Electrochemistry Communications*, 2005, vol. 7, no. 11, pp. 1133–1137.
10. Paulose M., Shankar K., Varghese O. K., Mor G. K., Hardin B. and Grimes C. A. Backside illuminated dye-sensitized solar cells based on titan nanotube array electrodes, *Nanotechnology*, 2006, vol. 17, no. 5, pp. 1446–1448.
11. Xiao P., Garcia B. B., Guo Q., Liu D. and Cao G.  $\text{TiO}_2$  nanotube arrays fabricated by anodization in different electrolytes for biosensing, *Electrochemistry Communications*, 2007, vol. 9, no. 9, pp. 2441–2447.
12. Paek S. M., Jung H., Lee Y. J., Park N. G., Hwang S. J., Choy J. H. Nanostructured  $\text{TiO}_2$  films for dye-sensitized solar cells, *Journal of Physics and Chemistry of Solids*, 2006, vol. 67, no. 5–6, pp. 1308–1311.
13. Wang Z. S., Huang C. H., Huang Y. Y. et al. A highly efficient solar cell made from a dye-modified  $\text{ZnO}$ -covered  $\text{TiO}_2$  nanoporous electrode, *Chemistry of Materials*, 2001, vol. 13, no. 2, pp. 678–682.
14. Meshcheryakov A. V., Sigaev A. P., Averin I. A., Karmannov A. A., Pronin I. A., Yakushova N. D. Modification of adsorption properties of nanomaterials based on zinc oxide and tin dioxide after additional activation in argon plasma, *Nano- i mikrosistemnaya tekhnika*, 2021, vol. 23, no. 4, pp. 186–192 (in Russian).
15. Bagheri Mohagheghi M. M., Tabatabai Yazdi Sh., Mousavi M. Transport, structural and optical properties of  $\text{SnO}_2$  transparent semiconductor thin films alloyed with chromium: carrier type conversion, *Journal of Materials Science Materials in Electronics*, May 2017, vol. 28 (6), pp. 1–8.
16. Zinchenko T. O., Pecherskaya E. A., Nikolaev K. O., Golubkov P. E., Shepeleva Y. V., Artamonov D. V. The study of the optical properties of transparent conductive oxides  $\text{SnO}_2\text{-Sb}$ , obtained by spray pyrolysis, *Journal of Physics: Conference Series*, 2019, vol. 1410 (1), 012090.
17. Ching—Prado E., Watson A., Miranda H. Optical and electrical properties of fluorine doped tin oxide thin film, *Journal of Materials Science: Materials in Electronics*, 2018, is. 18, 15299–15306.
18. Haddad N., Ben Ayadi Z., Mahdhi H., Djessas K. Influence of fluorine doping on the microstructure, optical and electrical properties of  $\text{SnO}_2$  nanoparticles, *Journal of Materials Science: Materials in Electronics*, 2017, vol. 28, is. 20, pp. 15457–15465.
19. Shamin A., Pecherskaya E., Nikolaev K., Zinchenko T., Shepeleva Y., Golovyashkin A. Quality Control of Technological Processes of Manufacturing Functional Solar Cells Layers Based on Hybrid Organic-Inorganic Perovskites, *2019 International Seminar on Electron Devices Design and Production (SED)*, 2019, pp. 1–5. DOI: 10.1109/SED.2019.8798441.1–5. 10.1109/SED.2019.8798441.
20. Shewale P. S., Patil S. I., Uplane M. D. Study of structural, electrical, optical, thermoelectric and photoconductive properties of S and Al co-doped  $\text{SnO}_2$  semiconductor thin films prepared by spray pyrolysis, *Semicond. Sci. Technol.*, 2010, 25, 115008.
21. Bagheri-Mohagheghi M. M., Shokooh-Saremi M. The electrical, optical, structural and thermoelectrical characterization of n- and p-type cobalt-doped  $\text{SnO}_2$  transparent semiconducting films prepared by spray pyrolysis technique, *Physica B*, 2010, 405, 4205–4210.
22. Moharrami F., Bagheri-Mohagheghi M. M., Azimi-Juybari H. Preparation of fluorine-doped tin oxide films at low substrate temperature by an advanced spray pyrolysis technique, and their characterization, *Thin Solid Films*, 2012, vol. 520, pp. 6503–6509.
23. Pecherskaya E. A., Golubkov P. E., Karpanin O. V., Artamonov D. V., Safronov M. I., Pechersky A. V. Investigation of the influence of technological parameters of the microarc oxidation process on the properties of oxide coatings, *News of higher educational institutions. Electronics*, 2019, vol. 24, no. 4, pp. 363–369 (in Russian).
24. Zinchenko T. O., Pecherskaya E. A., Golubkov P. E., Listuhin V. A., Zhurina A. E., Gurin S. A. Investigation of the Properties of Transparent Conductive Oxides Produced by Aerosol Pyrolysis, *Journal of Surface Investigationthis*, 2022, vol. 16 (6), pp. 1315–1321.
25. Zinchenko T., Pecherskaya E., Artamonov D. The properties study of transparent conductive oxides (TCO) of tin dioxide (ATO) doped by antimony obtained by spray pyrolysis, *AIMS Materials Science*, 2019, vol. 6, no. 2, pp. 276–287.

**В. А. Соловьев<sup>1</sup>**, доцент каф. "Нано- и микроэлектроника", e-mail: vitas\_psu@mail.ru,  
**И. А. Пронин<sup>1</sup>**, зав. каф. "Нано- и микроэлектроника", e-mail: pronin\_i90@mail.ru,  
**В. П. Мишкин<sup>2</sup>**, вед. инженер НИЛ электронной микроскопии и малоугловой рентгеновской дифрактометрии, e-mail: vladimir1978@mail.ru,  
**А. А. Карманов<sup>1</sup>**, доцент каф. "Нано- и микроэлектроника", e-mail: starosta07km1@mail.ru,  
**Н. Д. Якушова<sup>1</sup>**, ст. преподаватель каф. "Нано- и микроэлектроника", e-mail: yand93@mail.ru,  
**К. Н. Нищев<sup>2</sup>**, директор Института научноемких технологий и новых материалов, e-mail: nishchev@inbox.ru

<sup>1</sup> ФГБОУ ВО "Пензенский государственный университет",

<sup>2</sup> ФГБОУ ВО "Национальный исследовательский Мордовский государственный университет им. Н. П. Огарева".

## МОРФОЛОГИЧЕСКИЙ КОНТРОЛЬ ТОНКИХ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПЛЕНОК, ПОЛУЧЕННЫХ МАГНЕТРОННЫМ ВЧ РАСПЫЛЕНИЕМ И ТЕРМИЧЕСКИМ ИСПАРЕНИЕМ В ВАКУУМЕ

Поступила в редакцию 22.03.2023

*Методом атомно-силовой микроскопии исследованы тонкие диэлектрические пленки  $Al_2O_3$  и  $SrO$ , полученные термическим испарением в вакууме, а также пленки  $Si_3N_4$  и  $SiO_2$ , полученные магнетронным ВЧ распылением. Выполнена оценка метрических и фрактальных параметров диэлектрических слоев в графической программе анализа данных сканирующей зондовой микроскопии Gwyddion. Установлено, что максимальные значения фрактальной размерности характерны для пленок оксида алюминия толщиной 0,5 мкм, а наименьшую среднюю квадратичную шероховатость имеют пленки оксида стронция. Продемонстрированы перспективы использования анализируемых диэлектрических пленок в качестве изолирующего слоя чувствительных элементов тензорезистивных датчиков давления с проводящим упругим элементом.*

**Ключевые слова:** тонкие диэлектрические пленки, метрические и фрактальные параметры, атомно-силовая микроскопия, чувствительные элементы тензорезистивных датчиков давления

### Введение

Актуальность разработки новых и совершенствования известных датчиков давления не уменьшается с течением времени, о чем свидетельствуют многочисленные публикации в высокорейтинговых научных изданиях [1–3]. Данный факт, с одной стороны, объясняется постоянно возрастающими требованиями, которые к ним предъявляют, а с другой стороны, расширением сферы их использования, включая потребность в гибких носимых сенсорах [4, 5]. Такого рода устройства можно использовать во многих видах исследований, включая мониторинг дыхания [6], регистрацию пульса и других физиологических сигналов [7], а также обеспечение человеко-машинного интерфейса [8, 9]. Тензорезистивные датчики давления имеют ряд преимуществ по сравнению с датчиками, основанными на других принципах работы: низкое энергопотребление, высокая чувствительность в диапазоне низких давлений и простота регистрации сигнала [9, 10]. Для улучшения их характеристик используют различные методы и подходы, преимущественно направленные на оптимизацию тензорезистивного материала и улучшение структуры устройства. В рам-

ках первого подхода в качестве тензорезистивного материала предложено использовать углеродные нанотрубки [11], "щетинистые" микросфера оксида цинка [12], нанокомпозиты Ag/PDMS [13] и другие материалы. В рамках второго подхода основное внимание уделяется совершенствованию структуры устройства, например, созданию взаимосвязанного микроконусного интерфейса, обеспечивающего высокую межфазную прочность [14], или, например, защите устройства термически выращенным диоксидом кремния [15].

В зависимости от требований, предъявляемых к характеристикам датчика, а также от условий его эксплуатации структура чувствительного элемента (ЧЭ) может быть различна. Однако для ЧЭ датчиков, в которых используется проводящий упругий элемент, принципиально важным функциональным слоем является диэлектрический слой, изолирующий тензорезистор от других слоев структуры [16]. Основными критериями его выбора являются: обеспечение высокого сопротивления изоляции, возможность надежно передавать деформацию упругого элемента на тензорезистор, а также химическая неактивность по отношению к материалу упругого элемента и к тонкопле-

ночным структурам, формируемым на поверхности. Чрезвычайно низкая электропроводность тонких диэлектрических пленок на основе таких материалов, как  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{Si}_3\text{N}_4$ ,  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{SrO}$  и др., позволяет эффективно использовать их в качестве изолирующего слоя ЧЭ тензорезистивных датчиков давления. При этом воспроизводимое получение изолирующих слоев с обеспечением всех предъявляемых к ним требований является одной из важнейших задач в данной области. Достоверно установлено, что удельное сопротивление такой пленки определяется не только материалом, на основе которого она изготовлена, но также зависит от ее толщины и морфологии поверхности [17]. В частности, высокая шероховатость пленки, а также дефекты структуры могут приводить к значительному ухудшению изоляционных свойств. Целью настоящей работы является морфологический контроль тонких диэлектрических пленок, полученных термическим испарением в вакууме и магнетронным высокочастотным (ВЧ) распылением и используемых в качестве изолирующего слоя ЧЭ тензорезистивных датчиков давления.

## 1. Методика эксперимента и исследования

Тонкие пленки на основе  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{Si}_3\text{N}_4$ ,  $\text{SrO}$  и  $\text{SiO}_2$ , используемые в качестве изолирующего слоя чувствительного элемента тензорезистивного датчика давления, получали двумя основными методами:

1) термическим испарением в вакууме (использовали установку для напыления тонких пленок ВАК-600, *Balzers*);

2) магнетронным ВЧ распылением с мишени (использовали установки вакуумного напыления *Amod* и *EvoVac, Angstrom Engineering*).

Основные параметры, которые контролировали при получении тонких диэлектрических пленок, представлены в табл. 1. При использовании метода термического испарения в вакууме основными параметрами являлись температура подложки ( $T_{subs}$ ), время напыления ( $t_{sp}$ ) и ток через испаритель ( $I_{vap}$ ). При использовании магнетронного ВЧ распыления контролировали  $T_{subs}$ ,  $t_{sp}$ , а также мощность источника  $W$ ,

относительно максимально допустимой. Толщину  $d$  формируемых пленок оценивали с использованием "свидетеля".

Морфологию поверхности тонких диэлектрических пленок, полученных магнетронным ВЧ распылением и термическим испарением в вакууме, исследовали методом атомно-силовой микроскопии (использовали сканирующий зондовый микроскоп SPM 9600, *Shimadzu*, измерения проводили в полуконтактном режиме).

Для обработки и анализа изображений морфологии поверхности использовали программу визуализации и анализа данных сканирующей зондовой микроскопии (СЗМ) *Gwyddion*. Ко всем изображениям применяли операции вычитания полиномиального фона, исправления нуля, однократно был использован фильтр повышения резкости.

## 2. Результаты и обсуждение

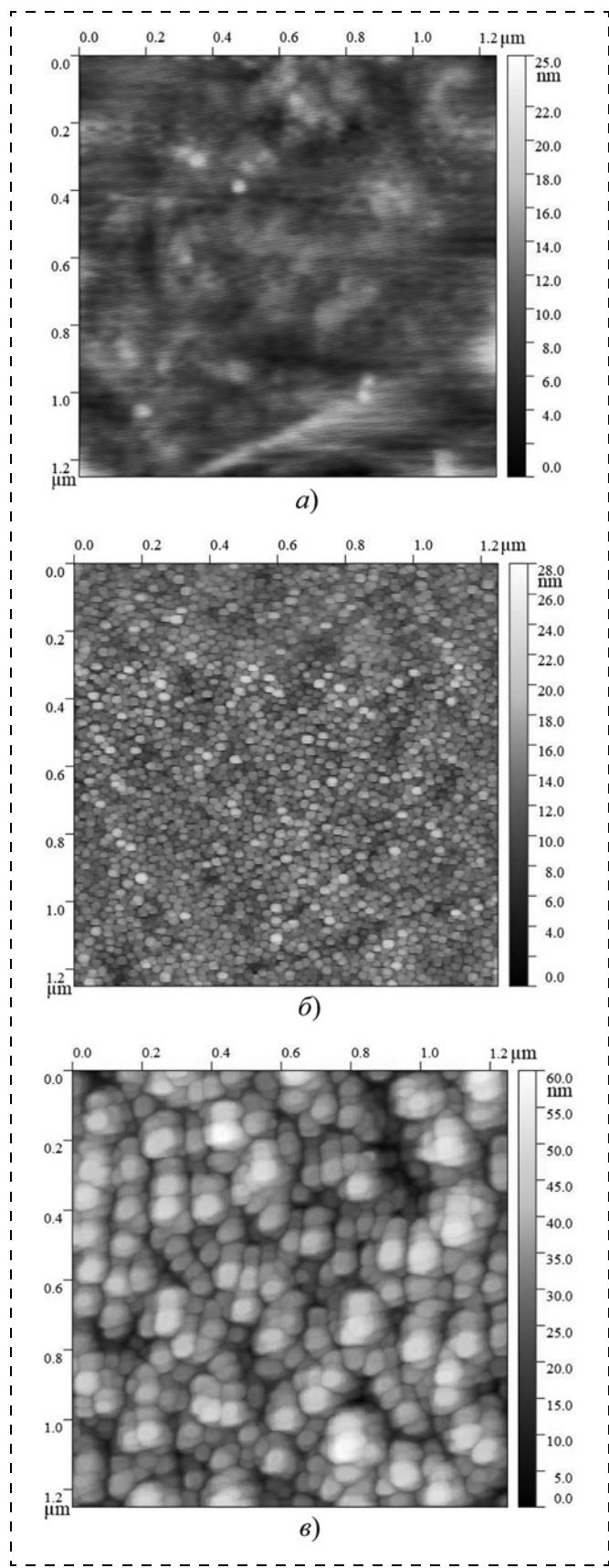
На рис. 1 представлены данные атомно-силовой микроскопии поверхности тонких диэлектрических пленок оксида алюминия различной толщины, полученных термическим испарением в вакууме.

Анализ полученных данных показывает, что для исследуемых пленок  $\text{Al}_2\text{O}_3$  характерна зернистая структура, причем средний размер зерен значительно увеличивается (от 20–30 нм до 60–80 нм) по мере увеличения времени напыления (от 30 до 75 мин). В результате чего, более толстым пленкам соответствует более крупный размер зерен. Однако для пленок  $\text{Al}_2\text{O}_3$  толщиной 0,3 мкм, кроме зернистой морфологии поверхности, очевидным является наличие дефектов структуры, глубина которых может быть соизмерима с толщиной пленки, что в конечном итоге может приводить к нарушению ее изоляционных свойств. Согласно анализу метрических величин с использованием программы *Gwyddion*, для пленок  $\text{Al}_2\text{O}_3$  максимальная высота пика ( $S_p$ ) и максимальная глубина впадины ( $S_v$ ) значительно увеличиваются относительно роста толщины. Так, для диэлектрических слоев с  $d = 0,3$  мкм характерны значения  $S_p = 15,30$  нм и  $S_v = 9,70$  нм, а для слоев с  $d = 0,8$  мкм значения  $S_p$

Таблица 1

**Основные параметры процесса получения тонких диэлектрических пленок ВЧ распылением и термическим испарением в вакууме**

Материал	$d$ , мкм	Метод получения (установка)	Параметр процесса получения			
			$T_{subs}$ , °C	$t_{sp}$ , мин	$I_{vap}$ , А	$W$ , %
$\text{Al}_2\text{O}_3$	0,3	Термическое испарение в вакууме (установка ВАК-600, <i>Balzers</i> )	100	30	135	—
	0,5		200	40	140	—
	0,8		150	75	150	—
$\text{Si}_3\text{N}_4$	0,7	Магнетронное ВЧ распыление с мишени (установка <i>Amod, Angstrom Engineering</i> )	200	90	—	30
$\text{SiO}_2$	0,5	Магнетронное ВЧ распыление с мишени (установка <i>EvoVac, Angstrom Engineering</i> )	200	180	—	70
$\text{SrO}$	0,15	Термическое испарение в вакууме (установка ВАК-600, <i>Balzers</i> )	100	40	140	—



**Рис. 1. Морфология поверхности тонких диэлектрических пленок  $\text{Al}_2\text{O}_3$  различной толщины полученных термическим испарением в вакууме:**  
а — 0,3 мкм; б — 0,5 мкм; в — 0,8 мкм

и  $S_v$  составляют 29,05 и 30,95 нм соответственно. Аналогично ведет себя и средняя квадратичная шероховатость ( $S_q$ ), которая равна 2,40, 2,57 и 8,50 нм для пленок толщиной 0,3, 0,5 и 0,8 мкм соответственно.

Данные атомно-силовой микроскопии поверхности тонких диэлектрических пленок нитрида кремния и диоксида кремния, полученных магнетронным ВЧ распылением, представлены на рис. 2.

Анализ морфологии поверхности показывает, что для пленок  $\text{Si}_3\text{N}_4$  и  $\text{SiO}_2$ , полученных магнетронным ВЧ распылением, как и для пленок  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , изготовленных термическим испарением в вакууме, характерна зернистая структура. При этом плотность упаковки зерен в нитриде кремния значительно выше, чем в диоксиде кремния, в то время как значения максимальной высоты пика и максимальной глубины впадины являются близкими. Так, для  $\text{Si}_3\text{N}_4$   $S_p = 10,04$  нм,  $S_v = 8,96$  нм, а для  $\text{SiO}_2$   $S_p = 11,25$  нм,  $S_v = 7,75$  нм. В свою очередь, для диоксида кремния характерна более высокая средняя квадратичная шероховатость, которая составляет 3,22 нм (в сравнении с 2,04 нм для  $\text{Si}_3\text{N}_4$ ), что отражает наличие в структуре пленки зерен с существенно отличающимися размерами (имеются зерна как размером более 60 нм, так и размером менее 10 нм).

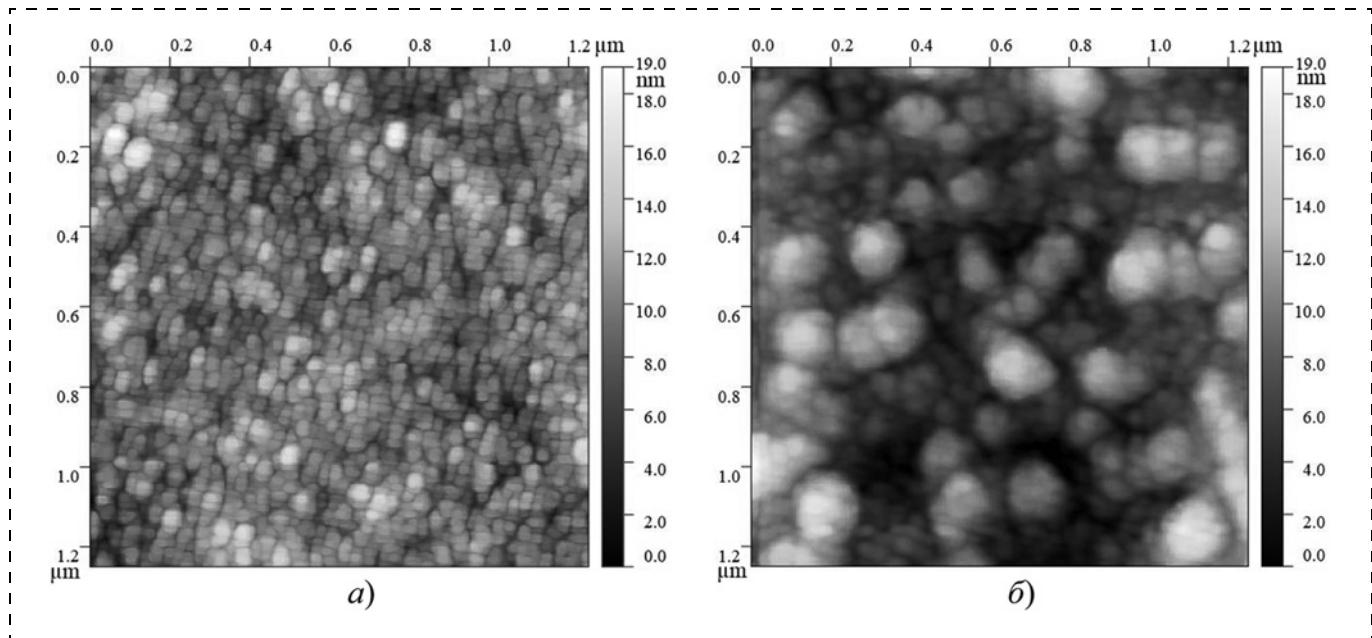
Данные морфологического контроля тонких диэлектрических пленок оксида стронция, полученных термическим испарением в вакууме, представлены на рис. 3. Горизонтальный профиль рельефа соответствует сечению, проходящему через середину изображения размером  $1,25 \times 1,25$  мкм.

Анализ представленных на рис. 3 данных показывает, что для тонких пленок оксида стронция толщиной 0,15 мкм, как и для остальных анализируемых оксидов, характерна зернистая плотноупакованная морфология. При этом использование термического напыления в вакууме при формировании  $\text{SrO}$  обеспечивает получение диэлектрического слоя с самой высокой гладкостью, что отвечает наименьшему из всех образцов значению средней квадратичной шероховатости ( $S_q = 1,84$  нм).

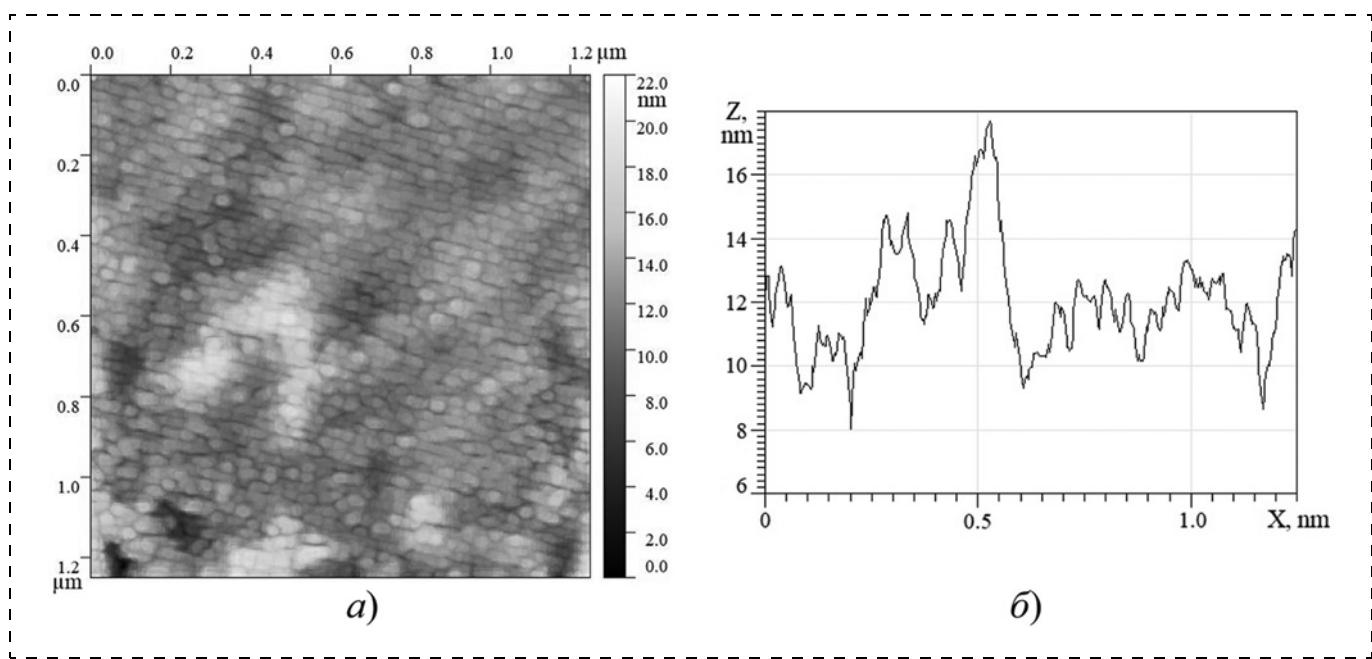
В табл. 2 представлены обобщенные данные по метрическим параметрам (средней квадратичной шероховатости, максимальной высоте пика и максимальной глубине впадины) морфологического контроля диэлектрических слоев  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{Si}_3\text{N}_4$ ,  $\text{SrO}$  и  $\text{SiO}_2$ .

Таблица 2  
**Метрические параметры морфологического контроля тонких диэлектрических пленок**

Параметр	Материал тонкой диэлектрической пленки					
	$\text{Al}_2\text{O}_3$	$\text{Al}_2\text{O}_3$	$\text{Al}_2\text{O}_3$	$\text{Si}_3\text{N}_4^-$	$\text{SiO}_2$	$\text{SrO}$
$d$ , мкм	0,3	0,5	0,8	0,7	0,5	0,15
$S_q$ , нм	2,40	2,57	8,50	2,04	3,22	1,84
$S_p$ , нм	15,30	13,25	29,05	10,04	11,25	10,25
$S_v$ , нм	9,70	14,75	30,95	8,96	7,75	11,75



**Рис. 2. Морфология поверхности тонких диэлектрических пленок, полученных магнетронным ВЧ распылением:**  
а —  $\text{Si}_3\text{N}_4$ ; б —  $\text{SiO}_2$



**Рис. 3. Морфология поверхности (а) и горизонтальный профиль рельефа (б) тонкой диэлектрической пленки  $\text{SrO}$ , полученной термическим испарением в вакууме**

Наряду с метрическими параметрами, для исследуемых диэлектрических слоев значительный интерес представляют фрактальные параметры, среди которых следует выделить фрактальную размерность поверхности, на основании которой возможно получение количественной информации о ее самоподобии и развитости [18–20]. В рамках настоящей работы фрактальную размерность оценивали по методу под-

счета кубов ( $D_{f\_1}$ ), триангуляции ( $D_{f\_2}$ ) и методу спектра мощности ( $D_{f\_3}$ ) с использованием программы *Gwyddion*. В табл. 3 представлены обобщенные данные по фрактальным параметрам морфологического контроля диэлектрических слоев  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{Si}_3\text{N}_4$ ,  $\text{SrO}$  и  $\text{SiO}_2$ .

Анализ представленных в табл. 3 данных показывает, что для всех диэлектрических слоев, за исключе-

Таблица 3

**Фрактальные параметры морфологического контроля тонких диэлектрических пленок**

Параметр	Материал тонкой диэлектрической пленки					
	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Si <sub>3</sub> N <sub>4</sub> <sup>-</sup>	SiO <sub>2</sub>	SrO
<i>d</i> , мкм	0,3	0,5	0,8	0,7	0,5	0,15
<i>D<sub>f</sub>_1</i>	2,309	2,481	2,304	2,366	2,237	2,302
<i>D<sub>f</sub>_2</i>	2,356	2,590	2,414	2,464	2,325	2,351
<i>D<sub>f</sub>_3</i>	2,355	2,779	2,412	2,546	2,386	2,496

чением оксида алюминия толщиной 0,5 мкм, характерны близкие значения фрактальной размерности. Используемый метод подсчета может оказывать достаточно сильное влияние на абсолютную величину *D<sub>f</sub>*, однако сохраняется общая тенденция, согласно которой тонкие диэлектрические пленки имеют близкие значения *D<sub>f</sub>* (учитывая параметры процесса изготовления). Существенное большое значение *D<sub>f</sub>*, равное 2,779 (для метода спектра мощности), характерно для Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> толщиной 0,5 мкм. Данный факт, по всей видимости, объясняется, с одной стороны, образованием морфологии поверхности самыми мелкими (из всех образцов) зернами, а, с другой стороны, их упаковкой, которая согласно метрическим параметрам сопровождается появлением пиков с максимальной высотой 13,25 нм и впадин с максимальной глубиной 14,75 нм.

### Заключение

Таким образом, анализ данных атомно-силовой микроскопии показал, что для тонких диэлектрических пленок Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>, SrO и SiO<sub>2</sub>, полученных термическим испарением в вакууме и магнетронным ВЧ распылением, характерна зернистая структура разной степени плотности упаковки. Варьирование параметров процесса изготовления в общем случае приводит к изменению морфологии их поверхности, однако зернистая структура пленок при этом сохраняется. Установлено, что наименьшее значение средней квадратичной шероховатости (*S<sub>q</sub>* = 1,84 нм) имеют, а, следовательно, являются наиболее гладкими (согласно метрологическим параметрам) пленки оксида стронция толщиной 0,15 мкм. Согласно анализу фрактальной размерности, для изоляционных слоев SrO также характерны невысокие значения *D<sub>f</sub>* = 2,302 (исходя из метода подсчета кубов), что отвечает невысокой развитости их поверхности. В совокупности с обеспечением требований по надежности передачи деформации упругого элемента на тензорезистор, а также химической неактивности, обозначенные особенности морфологии позволяют рассматривать пленки оксида стронция, как одни из наиболее перспективных изолирующих слоев для тензорезистивных датчиков давления.

### Список литературы

1. Wang Y., Lee S., Yokota, T. et al. A durable nanomesh on-skin strain gauge for natural skin motion monitoring with minimum mechanical constraints // Science advances. 2020. Vol. 6. N. 33. P. eabb7043.
2. Araromi O. A., Graule M. A., Dorsey K. L. et al. Ultra-sensitive and resilient compliant strain gauges for soft machines // Nature. 2020. Vol. 587. N. 7833. P. 219–224.
3. Wei Y., Shi X., Yao Z., Zhi, J. et al. Fully paper-integrated hydrophobic and air permeable piezoresistive sensors for high-humidity and underwater wearable motion monitoring // npj Flexible Electronics. 2023. Vol. 7. N. 1. P. 13.
4. Pang C., Lee G. Y., Kim T. I. et al. A flexible and highly sensitive strain-gauge sensor using reversible interlocking of nanofibres // Nature materials. 2012. Vol. 11. N. 9. P. 795–801.
5. Xu F., Li X., Shi Y. et al. Recent developments for flexible pressure sensors: A review // Micromachines. 2018. Vol. 9. N. 11. P. 580.
6. Fang Y., Xu J., Xiao X. et al. A Deep-Learning-Assisted On-Mask Sensor Network for Adaptive Respiratory Monitoring // Advanced Materials. 2022. Vol. 34. N. 24. P. 2200252.
7. Meng K., Xiao X., Wei W. et al. Wearable pressure sensors for pulse wave monitoring // Advanced Materials. 2022. Vol. 34. N. 21. P. 2109357.
8. Sun Q., Wang L., Yue X. et al. Fully sustainable and high-performance fish gelatin-based triboelectric nanogenerator for wearable movement sensing and human-machine interaction // Nano Energy. 2021. Vol. 89. P. 106329.
9. Kim D. H., Viventi J., Amsden J. J. et al. Dissolvable films of silk fibroin for ultrathin conformal bio-integrated electronics // Nature materials. 2010. Vol. 9. N. 6. P. 511–517.
11. Lipomi D. J., Vosgueritchian M., Tee B. C. et al. Skin-like pressure and strain sensors based on transparent elastic films of carbon nanotubes // Nature nanotechnology. 2011. Vol. 6. N. 12. P. 788–792.
12. Yin B., Liu X., Gao H. et al. Bioinspired and bristled micro-particles for ultrasensitive pressure and strain sensors // Nature communications. 2018. Vol. 9. N. 1. P. 5161.
13. Li H., Zhang J., Chen J. et al. A supersensitive, multidimensional flexible strain gauge based on Ag/PDMS for human activities monitoring // Scientific Reports. 2020. Vol. 10. N. 1. P. 1–9.
14. Zhang Y., Yang J., Hou X. et al. Highly stable flexible pressure sensors with a quasi-homogeneous composition and interlinked interfaces // Nature communications. 2022. Vol. 13. N. 1. P. 1317.
15. Shin J., Yan Y., Bai W. et al. Bioresorbable pressure sensors protected with thermally grown silicon dioxide for the monitoring of chronic diseases and healing processes // Nature biomedical engineering. 2019. Vol. 3. N. 1. P. 37–46.
16. Volokhov I. V., Gurin S. A., Vergazov I. R. Study of the properties of high-sensitivity thermally-stable thin-film resistance strain gauges for integral pressure sensors // Measurement techniques. 2016. Vol. 59. N. 1. P. 80–86.
17. Kaloyeros A. E., Pan Y., Goff J. Silicon nitride and silicon nitride-rich thin film technologies: state-of-the-art processing technologies, properties, and applications // ECS Journal of Solid State Science and Technology. 2020. Vol. 9. N. 6. P. 063006.
18. Аверин И. А., Игошина С. Е., Карманов А. А. Моделирование сенсорного отклика вакуумметров с чувствительными элементами на основе многокомпонентных оксидных наноматериалов с фрактальной структурой // Журнал технической физики. 2017. Т. 87, № 5. С. 780–787.
19. Мараева Е. В., Мошников В. А., Пронин И. А. Определение фрактальной размерности на основе анализа изображений атомно-силовой микроскопии металлооксидных нанокомпозитов // Нано- и микросистемная техника. 2018. Т. 20, № 8. С. 451–455.
20. Starodubtseva M. N., Starodubtsev I. E., Starodubtsev E. G. Novel fractal characteristic of atomic force microscopy images // Micon. 2017. Vol. 96. P. 96–102.

**V. A. Solovyov<sup>1</sup>**, Associate Professors of the Nano- and Microelectronics Department, e-mail: vitas\_psu@mail.ru, **I. A. Pronin<sup>1</sup>**, Head of the Nano- and Microelectronics Department, e-mail: pronin\_i90@mail.ru, **V. P. Mishkin<sup>2</sup>**, Leading Engineer, Research Laboratory of Electron Microscopy and Small-Angle X-Ray Diffractometry, e-mail: vladimir1978@mail.ru, **A. A. Karmanov<sup>1</sup>**, Associate Professors of the Nano- and Microelectronics Department, e-mail: starosta07km1@mail.ru, **N. D. Yakushova<sup>1</sup>**, Senior Lecturer, Department of Nano- and Microelectronics, e-mail: yand93@mail.ru, **K. N. Nishchev<sup>2</sup>**, Director of the Institute of High Technologies and New Materials, e-mail: nishchev@inbox.ru

<sup>1</sup> Penza State University

<sup>2</sup> National Research Mordovian State University named after I. I. N. P. Ogaryov

*Corresponding author:*

**Pronin Igor A.**, Dc. Sc., Associate Professor, Head of the Department, Penza State University, Penza, 440026, e-mail: pronin\_i90@mail.ru

## Morphological Control of thin Dielectric Films Obtained by RF Magnetron Sputtering and Thermal Evaporation in Vacuum

Received on March 22, 2023

Accepted on April 17, 2023

*Thin dielectric Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> and SrO films obtained by thermal evaporation in vacuum, as well as Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> and SiO<sub>2</sub> films obtained by RF magnetron sputtering, were studied by atomic force microscopy. The metric and fractal parameters of dielectric layers are estimated using the Gwyddion graphical program for analyzing data from scanning probe microscopy. It has been established that the maximum values of the fractal dimension are characteristic of aluminum oxide films with a thickness of 0.5 μm, while the smallest root-mean-square roughness is characteristic of strontium oxide films. The prospects for using the analyzed dielectric films as insulating layer of sensitive elements of strain gauge pressure sensors with a conductive elastic element are demonstrated.*

**Keywords:** thin dielectric films, metric and fractal parameters, atomic force microscopy, sensitive elements of strain gauge pressure sensors.

*For citation:*

**Solovyov V. A., Pronin I. A., MishkinV. P., Karmanov A. A., Yakushova N. D., Nishchev K. N.** Morphological Control of thin Dielectric Films Obtained by RF Magnetron Sputtering and Thermal Evaporation in Vacuum, *Nano-i mikrosistemnaya tekhnika*, 2023, vol. 25, no. 4, pp. 159–165.

DOI: 10.17587/nmst.25.159-165

### References

1. Wang Y., Lee S., Yokota, T. et al. A durable nanomesh on-skin strain gauge for natural skin motion monitoring with minimum mechanical constraints, *Science advances*, 2020, vol. 6, no. 33, pp. eabb7043.
2. Araromi O. A., Graule M. A., Dorsey K. L. et al. Ultra-sensitive and resilient compliant strain gauges for soft machines, *Nature*, 2020, vol. 587, no. 7833, pp. 219–224.
3. Wei Y., Shi X., Yao Z., Zhi, J. et al. Fully paper-integrated hydrophobic and air permeable piezoresistive sensors for high-humidity and underwater wearable motion monitoring, *npj Flexible Electronics*, 2023, vol. 7, no. 1, p. 13.
4. Pang C., Lee G. Y., Kim T. I. et al. A flexible and highly sensitive strain-gauge sensor using reversible interlocking of nanofibres, *Nature materials*, 2012, vol. 11, no. 9, pp. 795–801.
5. Xu F., Li X., Shi Y. et al. Recent developments for flexible pressure sensors: A review, *Micromachines*, 2018, vol. 9, no. 11, p. 580.
6. Fang Y., Xu J., Xiao X. et al. A Deep-Learning-Assisted On-Mask Sensor Network for Adaptive Respiratory Monitoring, *Advanced Materials*, 2022, vol. 34, no. 24, p. 2200252.
7. Meng K., Xiao X., Wei W., et al. Wearable pressure sensors for pulse wave monitoring, *Advanced Materials*, 2022, vol. 34, no. 21, p. 2109357.
8. Sun Q., Wang L., Yue X. et al. Fully sustainable and high-performance fish gelatin-based triboelectric nanogenerator for wearable movement sensing and human-machine interaction, *Nano Energy*, 2021, vol. 89, p. 106329.
9. Kim D. H., Viventi J., Amsden J. J. et al. Dissolvable films of silk fibroin for ultrathin conformal bio-integrated electronics, *Nature materials*, 2010, vol. 9, no. 6, pp. 511–517.
11. Lipomi D. J., Vosgueritchian M., Tee B. C., et al. Skin-like pressure and strain sensors based on transparent elastic films of carbon nanotubes, *Nature nanotechnology*, 2011, vol. 6, no. 12, pp. 788–792.
12. Yin B., Liu X., Gao H. et al. Bioinspired and bristled micro-particles for ultrasensitive pressure and strain sensors, *Nature communications*, 2018, vol. 9, no. 1, p. 5161.
13. Li H., Zhang J., Chen J. et al. A supersensitive, multidimensional flexible strain gauge sensor based on Ag/PDMS for human activities monitoring, *Scientific Reports*, 2020, vol. 10, no. 1, pp. 1–9.
14. Zhang Y., Yang J., Hou X. et al. Highly stable flexible pressure sensors with a quasi-homogeneous composition and interlinked interfaces, *Nature communications*, 2022, vol. 13, no. 1, p. 1317.

15. Shin J., Yan Y., Bai W. et al. Bioresorbable pressure sensors protected with thermally grown silicon dioxide for the monitoring of chronic diseases and healing processes, *Nature biomedical engineering*, 2019, vol. 3, no. 1, pp. 37–46.
16. Volokhov I. V., Gurin S. A., Vergazov I. R. Study of the properties of high-sensitivity thermally-stable thin-film resistance strain gauges for integral pressure sensors, *Measurement techniques*, 2016, vol. 59, no. 1, pp. 80–86.
17. Kaloyeros A. E., Pan Y., Goff J. Silicon nitride and silicon nitride-rich thin film technologies: state-of-the-art processing technologies, properties, and applications, *ECS Journal of Solid State Science and Technology*, 2020, vol. 9, no. 6, p. 063006.
18. Averin I. A., Igoshina S. E., Karmanov A. A. Modelirovaniye sensornogo otklika vakuummetrov s chuvstvitel'nyimi elementami na osnove mnogokomponentnykh oksidnykh nanomaterialov s fraktal'noj strukturoj, *Zhurnal tehnicheskoy fiziki*, 2017, vol. 87, no. 5, pp. 780–787.
19. Maraeva E. V., Moshnikov V. A., Pronin I. A. Opredelenie fraktal'noj razmernosti na osnove analiza izobrazhenij atomno-silovoj mikroskopii metallooksidnyh nanokompozitov, *Nano- i mikrosistemnaya tekhnika*, 2018, vol. 20, no. 8, pp. 451–455 (in Russian).
20. Starodubtseva M. N., Starodubtsev I. E., Starodubtsev E. G. Novel fractal characteristic of atomic force microscopy images, *Micron*, 2017, vol. 96, pp. 96–102 (in Russian).

УДК 538.975/621.316.849

DOI: 10.17587/nmst.25.165-170

**А. Б. Грабов<sup>1</sup>**, вед. инженер, mail@cniihm.ru, **С. А. Жукова<sup>1</sup>**, зам. нач. Центра, канд. техн. наук, доцент, mail@cniihm.ru, **В. И. Суханов<sup>2</sup>**, нач. отд., канд. техн. наук, sukhanov\_v@npoit.ru,

<sup>1</sup> Государственный научный центр Российской Федерации ФГУП "Центральный научно-исследовательский институт химии и механики", 115487, Москва, Россия

<sup>2</sup> АО "Научно-производственное объединение измерительной техники" (Холдинг АО "Российские космические системы"), 141074, г. Королев, Московской обл.

## РАЗРАБОТКА МЕТОДОВ СТАТИСТИЧЕСКОГО КОНТРОЛЯ ПРОЦЕССА В ТЕХНОЛОГИИ АНИЗОТРОПНЫХ МАГНИТОРЕЗИСТИВНЫХ ДАТЧИКОВ

Поступила в редакцию 17.02.2023

*Описано применение метода SPC к процессу производства анизотропных пленок для магниторезистивных датчиков. Вычислены корреляции между скоростью осаждения пленки, температурой подложки, временем осаждения и поверхностным сопротивлением, магниторезистивным эффектом, полем анизотропии, козэрцитивной силой. Показано, что наиболее сильная корреляция с анизотропным магниторезистивным эффектом в пленке ( $r_k = 0,78$ ) наблюдается у поверхностного сопротивления, что можно использовать для увеличения этого эффекта.*

**Ключевые слова:** магниторезистор, статистический контроль, корреляция, критические узлы, оптимизация, пермалloy, тонкие пленки

### Введение

Микроэлектромеханические системы (МЭМС) на основе анизотропных магниторезисторов (AMP) широко применяют в качестве датчиков различных физических величин [1–4]. Их популярность у разработчиков связана прежде всего с тем, что AMP-сенсоры изготавливают методами микроэлектронной технологии из тонкопленочных структур на основе пермаллоя Ni<sub>81</sub>Fe<sub>19</sub> и они могут быть легко миниатюризированы [5–7]. Кроме того, AMP-сенсоры характеризуются высокими значениями чувствительности, разрешающей способности и устойчивости к внешним факторам [8, 9].

При производстве AMP-сенсоров, как и всех электро-радиоизделий, важно обеспечить повторяемость выходных параметров и воспроизводимость технологических процессов [10]. Критической стадией, определяющей практически весь комплекс характеристик AMP-сенсора, является формирование тонких пленок анизотропного ферромагнетика Ni<sub>81</sub>Fe<sub>19</sub> [11, 12]. Стохастический характер данного технологического процесса приводит к нелинейному, динамическому характеру зависимости между параметрами техпроцесса и целевыми магнитофизическими параметрами. Это требует, как минимум, регулярного экспериментального подбора параметров напыления [13]. Поэтому на стадии производства AMP-датчиков необходимо раз-

разработать систему критериев, которые описывают взаимосвязи параметров техпроцесса, обеспечивающих выходные магнитные параметры прибора, заложенные на стадии разработки.

В технологии твердотельной микроэлектроники для этого применяют метод статистического контроля технологического процесса (SPC — Statistical Process Control) [14]. Процедуры SPC были разработаны на основе методик многофакторного анализа эксперимента и внедрены в систему менеджмента качества серии ИСО 9001/9002. SPC регулируется отраслевыми международными стандартами EIA-557, [15] JESD-19 [16] и др., но в приложении к магниточувствительным AMP-МЭМС, методы SPC не описываются.

В данной работе рассмотрена попытка применения методики SPC для оптимизации параметров процесса изготовления AMP-сенсоров, в первую очередь, на критической стадии формирования тонких пленок анизотропного ферромагнетика  $\text{Ni}_{81}\text{Fe}_{19}$ .

## 1. Исходные данные для SPC

*Критические узловые точки и целевые параметры.* В качестве критических узловых точек технологического процесса изготовления AMP-датчика можно выделить напыление анизотропной тонкой пленки мягкого ферромагнетика и фотолитографическое формирование топологического рисунка магниторезистивного слоя [17].

При напылении анизотропной пленки целевыми параметрами являются следующие магнито-физические свойства пленки, влияющие на чувствительность конечного AMP-датчика:

- значение поля магнитной анизотропии ( $H_k$ );
- коэрцитивная сила ( $H_c$ );
- анизотропный магниторезистивный эффект ( $dR/R$ );
- удельное поверхностное сопротивление ферромагнитной пленки ( $R_s$ );
- направление оси легкого намагничивания (ОНН)  $\Delta\alpha$ .

При проведении процесса напыления варьировали следующие параметры:

- скорость осаждения  $v$ ;
- температура подложки  $t$ ;
- время осаждения  $\tau$ ;
- ток источника  $j$ .

Предположительный характер обратных связей на уровне физики магнитных пленок между параметрами процесса напыления тонких ферромагнитных пленок и их целевыми магнитофизическими параметрами в общем виде выглядит следующим образом:

- повышение скорости осаждения вызывает увеличение размера зерна в структуре пленки, что влияет на увеличение  $H_k$ ;
- изменение температуры подложки влияет на единообразие текстуры, что управляет изменением  $H_c$ ;
- увеличение времени осаждения дает уменьшение  $R_s$ .

Метод SPC оперирует не только, и не столько физическими обратными связями, сколько статистическими корреляционными моделями, связывающими выходные параметры изделия и параметры техпроцессов его изготовления. В соответствии отраслевыми международными стандартами на SPC для построения статистической корреляционной модели любого техпроцесса необходимо на основании данных статистической обработки параметров достоверной выборки изделий вычислить системы корреляционных взаимосвязей между исходными параметрами техпроцесса и целевыми критическими параметрами изделия, а затем, используя вычисленные корреляционные взаимосвязи, выработать решения для параметрического управления стохастическим техпроцессом [14, 18].

*Формирование статистической выборки.* Образцы, предназначенные для формирования статистической выборки на кремниевых или сапфировых подложках  $\varnothing 76$  мм, а также на ситалловых подложках, имеют размеры  $60 \times 48$  мм. На подложках магнетронным напылением выращивали тонкие пленки  $\text{Ni}_{0,76}\text{Fe}_{0,18}\text{Co}_{0,06}$  толщиной 250...350 Å при температуре подложки 250...400 °C в постоянном однородном магнитном поле  $200 < H < 400$  Э. Общее число пластин в статистической выборке — 70 шт.

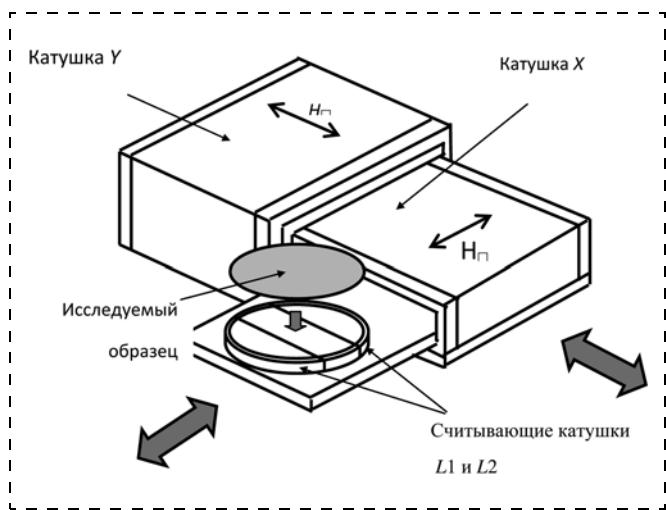
*Методы измерения.* Необходимый для SPC 100 %-ный контроль целевых параметров материалов и полуфабрикатов выполняли двумя независимыми неразрушающими методами: индукционной гистериографией и шестизондовым методом измерения поверхностного сопротивления в изменяющемся магнитном поле по J. Cavallo (далее "6-зондовый метод") [19].

Индукционную гистериографию выполняли на гистериографе ЖГ.6719 (разработчик АО "НПО ИТ"). Гистериограф ЖГ.6719 состоит из следующих блоков:

- измерительного блока (рис. 1), содержащего намагничивающую систему (катушки  $X$  и  $Y$ ), подложкодержателя  $\Pi$  с катушками считывания ( $L_1$  и  $L_2$ );
- генератора намагничивающего поля, состоящего из генератора звуковой частоты (ЗГ) и усилителя мощности (УМ);
- блока обработки и регистрации сигнала (БОС);
- опорных источников питания (ИП1, ИП2, ИП3);
- регистрирующего устройства АЦП "L-card" E20-10 с выходом на ПК.

Затем выполняли измерения 6-зондовым методом. Образцы устанавливали на поворотный столик установки ТИДН.182.01 (изготовитель СКТБ ФИРЭ РАН), которая непосредственно на поверхности ферромагнитной пленки измеряла локальное значение поверхностного сопротивления  $R_s$ , Ом/□. По изменению  $R_s = f(B)$  вычисляли коэффициент магнитосопротивления пленки  $dR/R_s$ :

$$dR/R_s = \frac{R_{s \max} - R_{s \min}}{R_{s \max}}. \quad (1)$$



**Рис. 1. Измерительный блок гистериографа ЖГ.6719 и схема измерений**

Коэрцитивную силу  $H_c$  определяли как разность  $\Delta H$  положения пиков  $R_{s\max}$  прямой и обратной ветвей зависимости  $R_s = f(H)$ . Положение ретроградного участка на нисходящей ветви этого графика соответствует значению поля смещения  $H_s$ . При этом поле магнитной анизотропии  $H_k$  представляет собой полуширину основания пика.

### 3. Обработка результатов измерений

*Гистограммы статистической выборки.* Первая процедура — SPC-построение гистограмм параметров-критериев годности для всей статистической выборки [18]. В качестве выборки использовали образцы тонких пленок  $\text{Ni}_{0,76}\text{Fe}_{0,18}\text{Co}_{0,06}$ . По календарному принципу были сгруппированы пять партий (I—V).

Гистограммы распределения параметров для каждой из пяти партий строили следующим образом:

- по оси абсцисс гистограмм откладывали измеренные значения целевых параметров. Фактический диапазон разделяли на восемь частей;

- по оси ординат откладывали частоту появления значения целевого параметра в данной области.

Полученные гистограммы распределения пленок по интервалам целевых параметров приведены на рис. 2 (см. вторую сторону обложки).

По данным гистограмм можно сделать следующие выводы:

- 1) вероятность появления пленки с  $H_c \leq 1,0$  Э увеличилась с 0,25 до 0,5;

- 2) вероятность появления пленки с  $H_k \leq 10,0$  Э уменьшилась с 0,6 до 0,22;

- 3) вероятность появления пленки с  $R_s \leq 10,0$  Ом увеличилась от 0,0 до 1,0 (!).

Вероятность появления пленки с  $dR/R \geq 3,0\%$  достигла 1,0, при этом для  $dR/R \geq 4,0\%$  вероятность составляет не менее 0,65, а для  $dR/R \geq 5,0\%$  не менее 0,03.

#### Диаграммы рассеяния и корреляции параметров.

Вторая процедура SPC — построение диаграмм рассеяния для различных пар параметров, как целевых, так и технологических, в целях поиска корреляций между ними [14]. Рассматривали зависимости параметров пленок от таких технологических параметров, как скорость спыливания магнетрона  $v$  и время напыления пленки  $t$  ( $\text{FeNiCo}$ ) [20]. Учитывая, что

$$v \approx \int_0^t I_m U_m T_n dt, \text{ для поиска корреляции вместо точно-}$$

го значения  $v$  можно пользоваться произведением  $I_m U_m T_n$ . Диаграммы рассеяния приведены на рис. 3.

Коэффициенты корреляции между парами параметров  $r_k$  рассчитывали по известной статистической формуле:

$$r_k = \frac{\sum_{j=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{(n-1)\sigma_x \sigma_y}, \quad (2)$$

где  $\bar{x}$  и  $\bar{y}$  — средние арифметические значения исследуемых параметров  $x$  и  $y$ ;  $n$  — число точек;  $\sigma_x$  и  $\sigma_y$  — средние квадратичные отклонения параметров, в свою очередь, рассчитываемые по формуле

$$\sigma_x = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n-1}}. \quad (3)$$

Таблица 1

**Коэффициенты корреляции  $r_k$  между некоторыми технологическими и магнитофизическими параметрами тонких пленок  $\text{Ni}_{0,76}\text{Fe}_{0,18}\text{Co}_{0,06}$**

Параметры	$H_k/H_c$ (гист.)	$H_k/H_c$ (6-ти зонд.)	$T_n$	$t$ ( $\text{FeNiCo}$ )	$R_s$	$dR/R$
$H_k/H_c$ (гист.)	1,0	0,25	0,261	0,18	0,061	-0,283
$H_k/H_c$ (6-зонд.)	Слабая	1,0	-0,002	0,032	0,068	0,007
$T_n$	Слабая	Очень слабая	1,0	0,581	0,443	-0,55
$t$ ( $\text{FeNiCo}$ )	Слабая	Очень слабая	Средняя	1,0	0,389	-0,07
$R_s$	Очень слабая	Очень слабая	Средняя	Средняя	1,0	-0,782
$dR/R$	Слабая	Очень слабая	Средняя	Очень слабая	Высокая	1,0

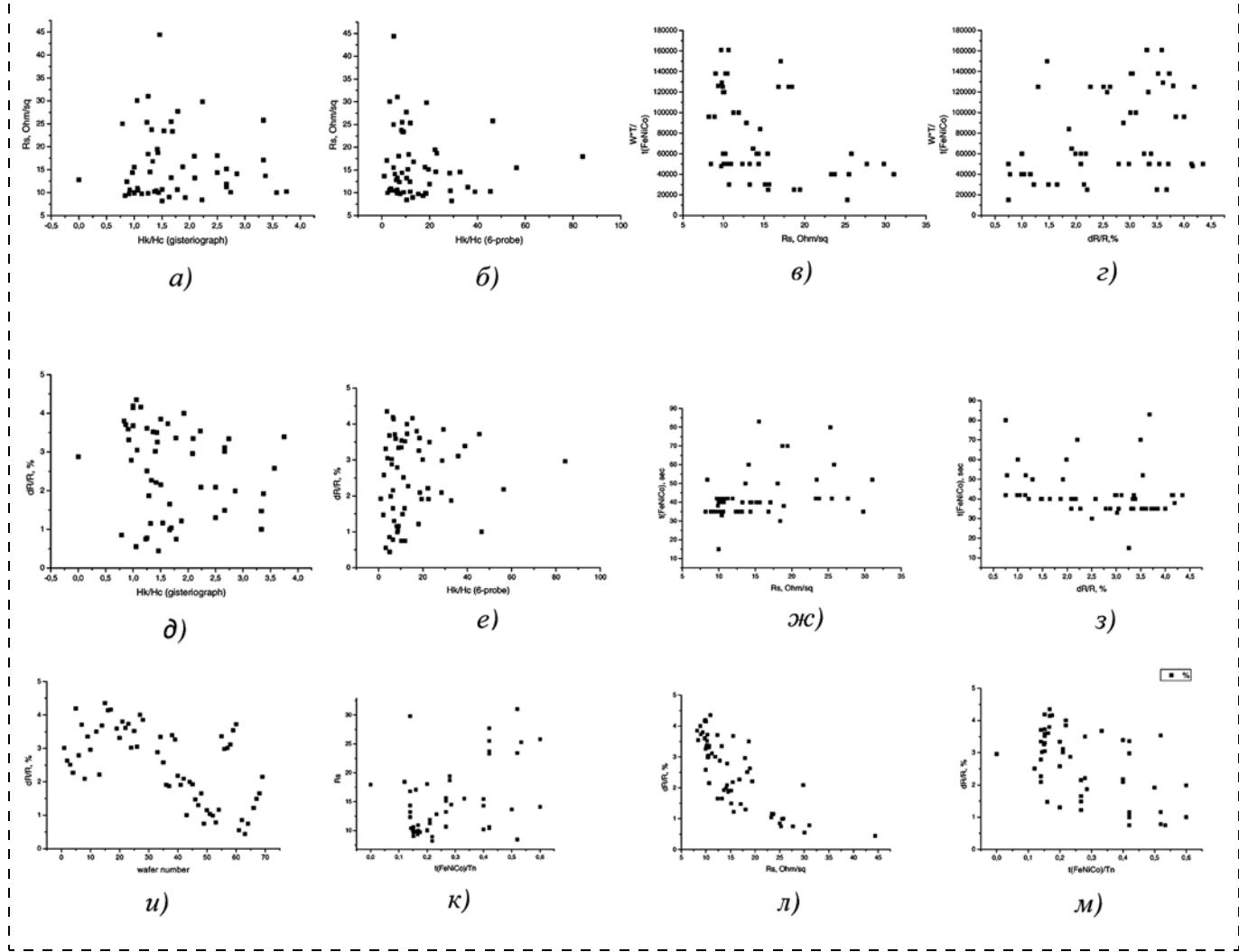


Рис. 3. Диаграммы рассеяния для 12 пар параметров:

*a* —  $R_s$  vs.  $H_k/H_c$  (гистр.); *б* —  $R_s$  vs  $H_k/H_c$  (6-зонд.); *в* —  $W(T)/t(FeNiCo)$  vs  $R_s$ ; *г* —  $W(T)/t(FeNiCo)$  vs  $dR/R$ ; *д* —  $\Delta\rho/\rho$  vs  $H_k/H_c$  (гистр.); *е* —  $\Delta\rho/\rho$  vs  $H_k/H_c$  (6-зонд.); *ж* —  $t(FeNiCo)$  vs  $R_s$ ; *з* —  $t(FeNiCo)$  vs  $dR/R$ ; *и* —  $dR/R$  vs № ; *к* —  $R_s$  vs  $t(FeNiCo)$ ; *л* —  $dR/R$  vs  $R_s$ ; *м* —  $dR/R$  vs  $t(FeNiCo)$

Расчетные значения  $r_k$  приведены в табл. 1. Из данных результатов видно, что только одна пара параметров ( $dR/R \sim R_s$ ) имеет сильную корреляцию. Корреляции в среднем диапазоне  $r_k$  имеют следующие пары параметров (в порядке убывания):  $T_n \sim t(FeNiCo)$ ;  $R_s \sim T_n$ ;  $R_s \sim t(FeNiCo)$ .

Также обратим внимание на тот факт, что корреляционный анализ показал очень низкую ( $r_k = 0,007$ ) зависимость  $dR/R \sim H_k/H_c$ . Хотя до внедрения 6-зондового метода, при работе с партиями I и II, основным критерием отбраковки пленок служило именно соотношение  $H_k/H_c \geq 3$ .

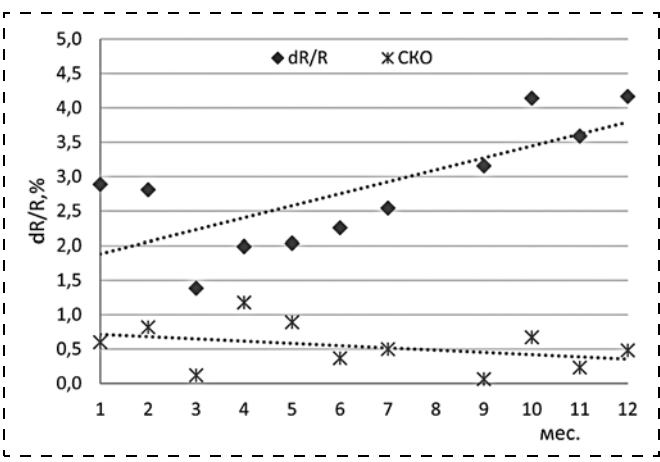
По результатам анализа гистограмм и диаграмм рассеяния были уточнены диапазоны целевых параметров-критерииев годности для тонких пленок  $Ni_{0,76}Fe_{0,18}Co_{0,06}$ . Их значения приведены в табл. 2.

С точки зрения методики SPC, самым удобным для оптимизации критическим параметром оказался  $R_s$ .

Значением  $R_s$  относительно легко управлять при напылении. Поэтому при работе над партией V пленки оптимизировали по значениям  $R_s$  и  $H_k$ . в результате 100 % пленок имели характеристики в целевом ди-

Таблица 2  
Параметры — критерии годности тонких пленок  
 $Ni_{0,76}Fe_{0,18}Co_{0,06}$

Наименование параметра	Обозначение	Значение параметра		
		Мин.	Оптимум	Макс.
Коэрцитивная сила, Э	$H_c$	0,0	<1,0	3,5
Поле анизотропии, Э	$H_k$	10	11	14
Поверхностное сопротивление, Ом/кв.	$R_s$	7,0	7,7	9,0
Магниторезистивный эффект, %	$\Delta R/R$	3,0	>4,0	>5,0



**Рис. 4. Линия регрессии магниторезистивного эффекта  $dR/R$  и его СКО по результатам выполнения процедур SPC**

пазоне интегрального  $H_k$ , из них 60 % имели целевое значение  $R_s$ . В результате оказалось, что 100 % пленок имеют  $dR/R$  больше 3 %, а 65 % пленок — больше 3,5 % (рис. 4).

## Заключение

Возможность проведения 100 %-ного неразрушающего контроля параметров-критериев годности тонких пленок анизотропных ферромагнетиков позволяет внедрить процедуры SPC при производстве магниторезистивных датчиков. При этом наибольший коэффициент корреляции (0,782) имеют два параметра:  $dR/R \sim R_s$ . Технологические методы управления  $R_s$  позволяют увеличить магниторезистивное соотношение до 3,5 % и выше.

## Список литературы

1. Tumanski S. Thin film magnetoresistive sensors. IOP Publishing Ltd, 2001. 441 p.
2. Kasatkin S. I., Murav'ev A. M., Plotnikova N. V. et al. Anisotropic magnetoresistive sensors of the magnetic field and current // Autom Remote Control. 2009. Vol. 70. P. 1043–1053. DOI.org/10.1134/S0005117909060101.
3. Касаткин С. И., Васильева Н. П., Муравьев А. М. Спин-тронные магниторезистивные элементы и приборы на их основе. М.: Электросервис, 2005. 160 с.
4. Djuzhev N., Iurov A., Chinenkov M. Magnetic Field MEMS-Sensor: Functional Characteristics Control during the Formation of Magnetosensitive Structures // Diffusion and Defect Data. 2018. Vol. 386. P. 161–166. DOI: 10.4028/www.scientific.net/DDF.386.161.
5. Амеличев В. В., Гамард И. А., Касаткин С. И. и др. Анизотропные магниторезистивные преобразователи на основе ферромагнитныхnanoструктур с различным содержанием кобальта // Нано- и микросистемная техника. 2010. № 2 (115). С. 22–24.
6. Hauser H., Stangl G., Fallmann W., Chabicovsky R., Riedling K. Magnetoresistive Sensors. Preparation, Properties and Applications of Thin Ferromagnetic Films // Proc. of Workshop at Vienna University of Technology. June 15th–16th, 2000. P. 15–27.
7. Otterbach R., Hilleringmann U. Deposition and Etching of Permalloy. Preparation, Properties and Applications of Thin Ferromagnetic Films // Proc. of Workshop at Vienna University of Technology. June 15th–16th, 2000. P. 63–68.
8. Brown P., Beek T., Carr C. et al. Magnetoresistive magnetometer for space science applications // Meas. Sci. Technol. 2012. Vol. 23. 025902 (11 p.). DOI: 10.1088/0957-0233/23/2/025902.
9. Diaz-Michelena M. Small magnetic sensors for Space Applications // Sensors. 2009. Vol. 9. P. 2271–2288.
10. Zheng Ch., Zhu K., Cardoso S. de Freitas et al. Magnetoresistive Sensor Development Roadmap (Non-Recording Applications) // IEEE Transactions on Magnetics. April 2019. Vol. 55. Is. 4. DOI: 10.1109/TMAG.2019.2896036.
11. Mac-Guire T. R., Potter R. I. Anisotropic magnetoresistance in Ferromagnetic 3-d Alloys // IEEE Transactions on Magnetics. July 1975. Vol. 11, No. 4. P. 1018–1038.
12. Stangl G., Aigner P., Hauser H., Hochreiter J., Riedling K. Cathode Sputtered Permalloy Films of High AMR Effect and Low Coercivity. "Preparation, Properties and Applications of Thin Ferromagnetic Films" // Proc. of Workshop at Vienna University of Technology. June 15th–16th, 2000. P. 57–61.
13. Ажаева Л. А., Грабов А. Б., Суханов В. И., Тимофеев Б. В. Разработка AMP-сенсора индукции магнитного поля Земли на основе тонких пленок сплава  $Ni_{0,76}Fe_{0,18}Co_{0,06}$  // Датчики и системы. 2020. № 1 (243). С. 34–41.
14. May G. S., Spanos C. J. Fundamentals of semiconductor manufacturing and process control. New Jersey: John Wiley & Sons, Inc. Hoboken, 2006. 480 p.
15. EIA-557-A. Statistical Process Control Systems. ANSI/EIA-557-A-1995. 35 p.
16. JEP70-B. Quality and Reliability Standards and Publications. JEDEC Publication. 1999. 28 p.
17. Суханов В. И., Грабов А. Б. Тонкопленочные магниторезистивные датчики и измерительные преобразователи магнитной индукции // Информационно-технологический вестник. 2018. № 2 (16). С. 35–44.
18. Статистические методы контроля и управления. Сб. статей / Под ред. Герасимовой Г. Е. М.: HTK "Трек", 2010. 144 с.
19. US Statutory Invention Registration H585. Anisotropic magnetoresistance measurement apparatus and method thereof / J. Cavallo. Reg. Number H585, Published Feb. 7, 1989. Appl. No. 146,012.
20. Джумалиев А. С., Никулин Ю. В., Филимонов Ю. А. Формирование текстурированных пленок Ni(200) и Ni(111) методом магнитного распыления // ЖТФ. 2016. Том 86, вып. 6. С. 126–131.

A. B. Grabov, Senior Engineer, mail@cniihm.ru, S. A. Zhukova, Ph. D., Associate Professor Deputy Head of Division, mail@cniihm.ru,  
FSUE-State Scientific Center "Central Scientific-Research Institute of Chemistry and Mechanics".  
Moscow, 115487, Russian Federation  
V. I. Sukhanov, Head o Department, Ph. D., sukhanov\_vi@npoit.ru,  
JSC "Scientific-Production Association of Measurement Technics"  
(Holding JSC "Russian Space Systems"), Korolyov, Moscow Reg. 141074, Russian Federation

*Corresponding author:*

**A. B. Grabov**, Senior Engineer, FSUE-State Scientific Center "Central Scientific-Research Institute of Chemistry and Mechanics". Moscow, 115487, Russian Federation  
E-mail: mail@cniihm.ru

# Development of Statistical Process Control Methods for Anisotropic Magnetoresistive Sensor Technology

Received on February 17, 2023  
Accepted on March 15, 2023

*An application of some statistical process control methods for production process of thin anisotropic ferromagnetic films are described. There was calculated the correlation between the thin film deposition rate, substrate's temperature, time of deposition and surface resistivity, magnetoresistive effect, anisotropy field, coercive force of thin film. It was shown that more strong correlation ( $r_k = 0,78$ ) with AMR-effect's value in film observe for surface resistivity that can use for AMR-effect rising.*

**Keywords:** magnetoresistor, statistical process control, correlation, critical points, optimization, permalloy, thin films

*For citation:*

**Grabov A. B., Zhukova S. A., Sukhanov V. I.** Development of Statistical Process Control Methods for Anisotropic Magnetoresistive Sensor Technology, *Nano-i mikrosistemnaya tekhnika*, 2023, vol. 25, no. 4, pp. 165–170.

DOI: 10.17587/nmst.25.165-170

## References

1. Tumanski S. Thin film magnetoresistive sensors. IOP Publishing Ltd, 2001. 441 p.
2. Kasatkin S. I., Murav'ev A. M., Plotnikova N. V. et al. Anisotropic magnetoresistive sensors of the magnetic field and current // Automatic Remote Control. 2009, vol. 70, pp. 1043–1053. DOI.org/10.1134/S0005117909060101
3. Kasatkin S. I., Vasilieva H. P., Murav'ev A. M. Spintorronics Magnetoresistive Elements and Devices based on it. Moscow, Elektrosvet, 2005, 160 p. (in Russian).
4. Djuzhev N., Iurov A., Chinenkov M. Magnetic Field MEMS-Sensor: Functional Characteristics Control during the Formation of Magnetosensitive Structures. Diffusion and Defect Data. 2018, vol. 386, pp. 161–166. DOI: 10.4028/www.scientific.net/DDF.386.161;
5. Amelichev V. V., Gamartz I. A., Kasatkin S. I. et al. Anisotropic Magnetoresistive Tranducers based on Ferromagnetics Nanostuctures with the Different Cobalt Contents // Nano- i Mikrosistemnaya Tekhnika, 2010, no. 2 (115), pp. 22–24 (in Russian).
6. Hauser H., Stangl G., Fallmann W., Chabicosky R., Riedling K. Magnetoresistive Sensors. Preparation, Properties and Applications of Thin Ferromagnetic Films. Proc. of Workshop at Vienna University of Technology, June 15th–16th, 2000, pp. 15–27.
7. Otterbach R., Hilleringmann U. Deposition and Etching of Permalloy. Preparation, Properties and Applications of Thin Ferromagnetic Films. Proc. of Workshop at Vienna University of Technology. June 15th–16th, 2000, pp. 63–68.
8. Brown P., Beek T., Carr C. et al. Magnetoresistive magnetometer for space science applications, *Meas. Sci. Technol.*, 2012, vol. 23, 025902 (11 p.). DOI: 10.1088/0957-0233/23/2/025902.
9. Diaz-Michelen M. Small magnetic sensors for Space Applications, *Sensors*, 2009, vol. 9, pp. 2271–2288.
10. Zheng Ch., Zhu K., Cardoso de Freitas S. et al.: Magnetoresistive Sensor Development Roadmap (Non-Recording Applica-
- tions), *IEEE Transactions on Magnetics*, April 2019, vol. 55, iss. 4, doi: 10.1109/TMAG.2019.2896036.
11. Mac-Guire T. R., Potter R. I. Anisotropic magnetoresistance in Ferromagnetic 3-d Alloys. *IEEE Transactions on Magnetics*, July 1975, vol. 11, no. 4, pp. 1018–1038.
12. Stangl G., Aigner P., Hauser H., Hochreiter J., Riedling K. Cathode Sputtered Permalloy Films of High AMR Effect and Low Coercivity. *Preparation, Properties and Applications of Thin Ferromagnetic Films. Proc. of Workshop at Vienna University of Technology*, June 15th–16th, 2000. pp. 57–61.
13. Azhayeva L. A., Grabov A. B., Sukhanov V. I., Timofeev B. V. Development of AMR Sensor Induction of Earth Magnetic Field based on Thin Films Ni0.76Fe0.18Co0.06 alloy, *Sensors and Systems*, 2020, no. 1 (243), pp. 34–41 (in Russian).
14. May G. S., Spanos C. J. Fundamentals of semiconductor manufacturing and process control. Hoboken, New Jersey, John Wiley & Sons Inc., 2006. 480 p.
15. EIA-557-A. Statistical Process Control Systems. ANSI/EIA-557-A-1995. 35 p.
16. JEP70-B. Quality and Reliability Standards and Publications, *JEDEC Publication*, 1999. 28 p.
17. Sukhanov V. I., Grabov A. B. Thin Films Magnetoresistive Sensors and Measurement Tranducers of Magnetic Induction, *Information and Technology Digest*, 2018, no. 2 (16), pp. 35–44 (in Russian).
18. Statistical Methods of the Control and Management / Ed. by Gerasimova G. E. Moscow, STC "Trek", 2010. 144 p. (in Russian).
19. US Statutory Invention Registration H585 "Anisotropic magnetoresistance measurement apparatus and method thereof" J. Cavallo, Reg. Number H585, Published Feb. 7, 1989. Appl. no. 146, 012.
20. Dzhumaliev A. S., Nikulin Yu. V., Filimonov Yu. A. Textured Films of Ni(200) and Ni(111) Forming by the Magnetron Sputtering, *JTP*, 2016, vol. 86, is. 6, pp. 126–131.

**А. С. Ефимов<sup>1</sup>**, инженер 2 категории, easmov@gmail.com; **А. М. Темнов<sup>1</sup>**, д-р техн. наук, ст. науч. сотр., **А. А. Зайцев<sup>2</sup>**, канд. техн. наук, ст. науч. сотр., **Д. Д. Королькова<sup>1</sup>**, инженер-технолог; **А. Н. Пашков<sup>1</sup>**, канд. техн. наук, зам. нач. НПК; **Т. М. Есипова<sup>1</sup>**, инженер, **Н. А. Шарапов<sup>1</sup>**, инженер; **К. В. Дудинов<sup>1</sup>**, зам. нач. НПК; **А. С. Курочка<sup>1</sup>**, канд. техн. наук, инженер 1 категории; **Р. Г. Белов<sup>1</sup>**, инженер-технолог 2 категории

<sup>1</sup> Научно-Производственное предприятие "Исток" им. А. И. Шокина", ул. Вокзальная, 2а, г. Фрязино, 141190 Россия

<sup>2</sup> Национальный исследовательский университет "МИЭТ", Площадь Шокина, 1, Зеленоград, г. Москва, 124498 Россия

## СИСТЕМА Au—Sn ДЛЯ МОНТАЖА КРИСТАЛЛОВ НА ПЛАСТИНЕ В МИКРОЭЛЕКТРОНИКЕ СВЧ МЕТОДОМ ВЗАЙМНОЙ ПЕРЕХОДНОЙ ДИФФУЗИИ

Поступила в редакцию 17.04.2023

Рассмотрена технология монтажа взаимной переходной диффузией Au—Sn для применения в микроэлектронике СВЧ. Последовательная система чередующихся металлов золота и олова из пяти слоев общей толщиной около 4,5 мкм была реализована напылением металлических пленок. Морфологические и фазовые характеристики сформированной системы исследованы до и после воздействия температуры 320 °C при выдержке 10 мин. После термообработки образуется единый слой, состоящий из фазы  $\zeta$  ( $Au_{0,853} Sn_{0,147}$ ). Монтаж кристаллов с помощью сформированной системы слоев показал средние показатели прочности соединения на сдвиг 32,2 МПа.

**Ключевые слова:** микроэлектроника СВЧ, монтаж, широкозонные полупроводники, Au—Sn, взаимная переходная диффузия, гетерогенная интеграция

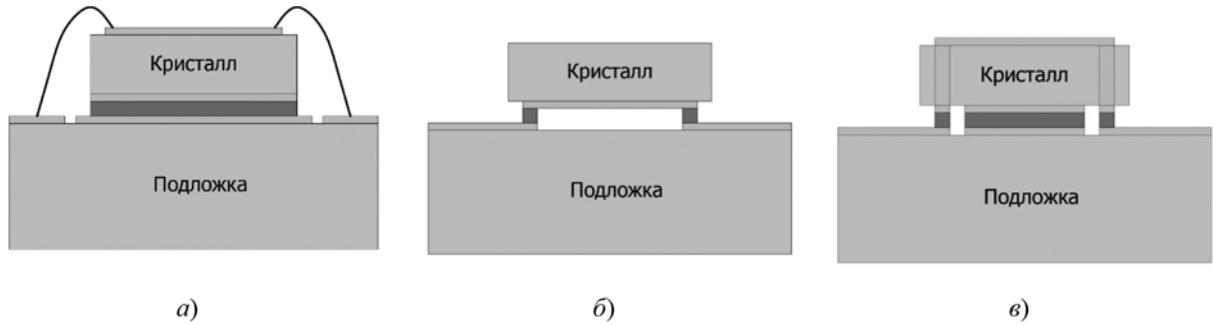
### Введение

Электронная компонентная база (ЭКБ) аналоговой микроэлектроники СВЧ развивается в части повышения уровней мощности, рабочих частот, полосы и степени интеграции.

Широкозонные полупроводники, такие как нитрид галлия (GaN) на подложках кремния (Si) или карбida кремния (SiC) являются основой нового поколения аналоговой микроэлектроники СВЧ, рассеивающая мощность которой превышает аналоги на GaAs в 3–5 раз [1]. Соединение отдельных монолитных интегральных схем (МИС) в единий модуль является важным переходом от характеристик дискретных кристаллов к функциональной системе. Одним из критических факторов, влияющих на тепловой режим схемы, является этап соединения кристалла с интегрирующей подложкой. Данный процесс должен обеспечивать низкие электрическое и тепловое сопротивления, высокую механическую прочность. Соединяющий слой, обеспечивающий контакт кристалла с подложкой, вносит критическое добавление теплового сопротивления, что приводит к ограничениям по максимально допустимой рассеивающей мощности, надежности и области применения функциональных изделий [2–4]. В связи с этим проблема улучшения тепловых характеристик соединяющего слоя при

монтаже кристаллов актуальна при переходе на новый уровень компонентной базы по показателю выходной мощности.

В то время как монолитные интегральные схемы СВЧ имеют заметное продвижение вверх по частотному диапазону, электрический контакт межсоединений остается проблемным и ограничивающим фактором применения широкополосной ЭКБ миллиметрового диапазона частот [5]. Необходимость снижения потерь СВЧ и паразитных составляющих межсоединений кристаллов, а также снижения массогабаритных характеристик для функциональных схем миллиметрового диапазона ведет к повышенному интересу к беспроволочному соединению кристаллов — *flip-chip*, либо его разновидности, *hot-via* (рис. 1) [6–8]. Новые подходы к интеграции на их основе — 3D-архитектура, а также компактная интеграция двух и более разных полупроводниковых технологий — гетерогенная интеграция, ведут к значительному повышению гибкости возможной разработки систем, повышению электрических параметров и снижению массогабаритных характеристик [9]. Уход от проволочного монтажа подразумевает локальное соединение кристалла с подложкой. Тенденция снижения паразитных составляющих межсоединений нацеливает на миниатюризацию размеров межсоединений [10]. Следовательно необходимо точное локальное нанесе-



**Рис. 1. Методы интеграции кристаллов:**

а — проволочный; б — flip-chip; в — hot-via

ние соединяющего слоя с шагом в единицы микрометров.

Совокупность описанных выше направлений развития повышает актуальность и интерес к видам надежных межсоединений с минимальными габаритными характеристиками и паразитными составляющими. Таким образом, актуальная проблема современной микроэлектроники СВЧ — разработка соединяющего слоя, который обеспечит возможность реализации интеграции МИС СВЧ нового поколения. Современный уровень монтажа кристаллов в микроэлектронике СВЧ имеет несколько вариантов соединения кристаллов с подложкой или друг с другом.

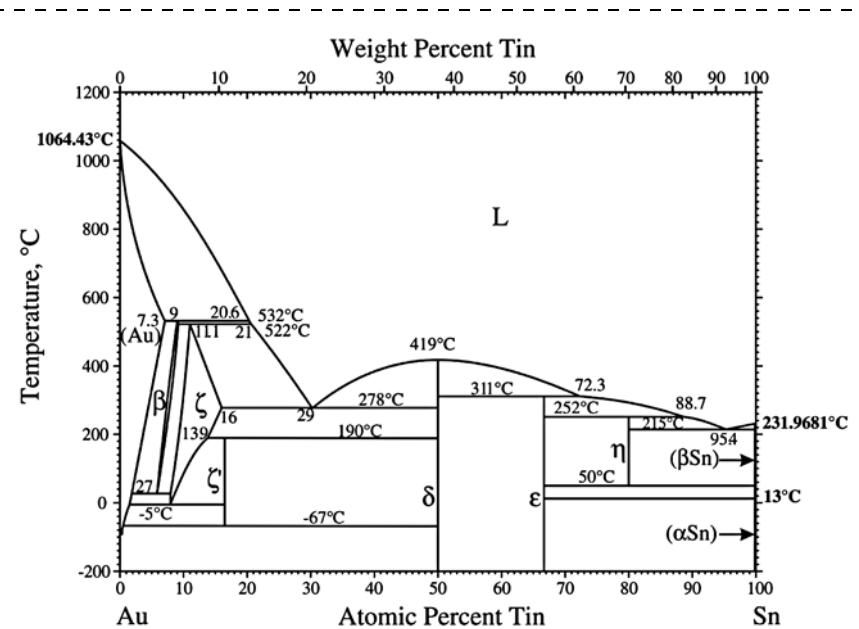
В данной работе описано исследование монтажа взаимной переходной диффузии Au—Sn для применения в микроэлектронике СВЧ. Цель данной работы — исследовать и разработать технологию формирования соединительного слоя для МИС СВЧ с применением системы слоев Au—Sn, сформированных на этапе производства пластины, исследовать характеристики сформированной системы Au—Sn. Соединяющий слой должен быть совместим с подложкой и металлизацией кристалла, иметь низкое тепловое сопротивление, достаточно высокую температуру плавления после монтажа, обеспечивать прочное соединение без деградации во времени при широком диапазоне температур. Необходимо точное локальное нанесение соединяющего слоя с шагом 10 мкм и толщиной от сотен нанометров до десятков микрометров.

Задачи, рассмотренные в данной работе, включают исследование формирования системы слоев Au—Sn, исследование морфологических и фазовых характеристик системы слоев, соединение кристаллов с применением сформированной системы и его анализ.

## 1. Система Au—Sn

Система Au—Sn имеет сложную фазовую диаграмму [11]. Система имеет две эвтектические точки и шесть интерметаллических соединений, стабильных при комнатной температуре. Бинарная система фазовых состояний золота—олова (Au—Sn) представлена на рис. 2. Основные характеристики фазовых состояний золота—олова представлены в табл. 1.

Технология монтажа методом взаимной переходной диффузии (англ. — *Solid-Liquid Interdiffusion* — взаимодиффузия твердой и жидкой фаз) является многообещающей альтернативой соединения кристаллов. Термин *Solid-Liquid Interdiffusion* (SLID) был введен в 1966 г. Л. Берштейном [15]. Он определил этот процесс как формирование стабильных высокотемпературных интерметаллических соединений путем диффузии между твердой и жидкой фазами. Применение подобных реакций описывается и другими



**Рис. 2. Фазовая диаграмма Au—Sn [11]**

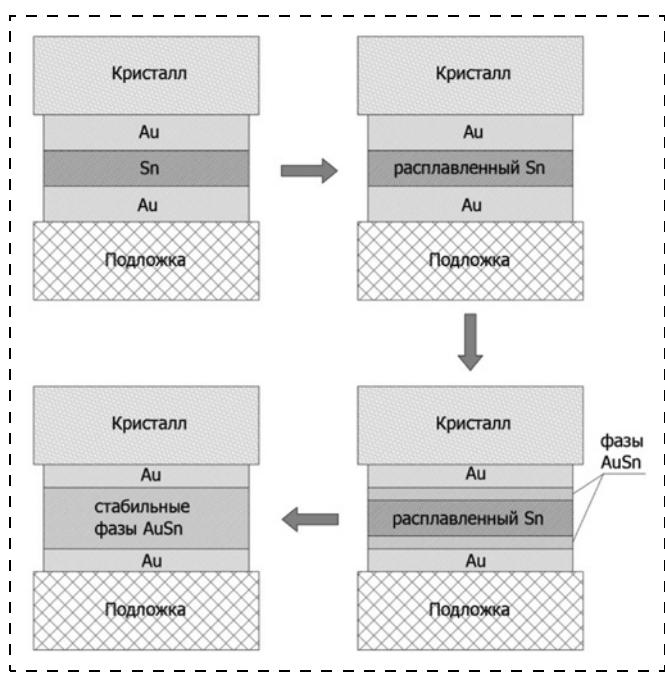


Рис. 3. Схематичное представление процессов взаимной переходной диффузии

терминами: *Transient Liquid Phase* (TLP), введенный Д. Паулонисом, Д. Дуваллом и У. Овцарски в 1972 г. [16], *off-eutectic* [17] или *isothermal solidification* [18]. Все они описывают соединение двух поверхностей путем реакции изотермического затвердевания между низкотемпературным и высокотемпературным металлами [19].

SLID монтаж, или монтаж взаимной переходной диффузией определяется как формирование твердой связи путем реакции изотермического затвердевания. Традиционно в подобном процессе выделяют четыре основных этапа [20, 21]. Схематичное представление проиллюстрировано на рис. 3 на примере простой системы Au—Sn. Первый этап — соединение поверхностей и их предварительный нагрев. Давление при контакте варьируется от 1 до 10 МПа. Второй этап — разогрев до температуры, превышающей температуру плавления Sn. Превышение температуры плавления

Sn сопровождается поверхностными (границыми) реакциями и симметричным ростом интерметаллических составляющих в низкотемпературном слое. Третий этап — изотермическое затвердевание. Постепенный рост твердой фазы в виде интерметаллических соединений, при котором уменьшается слой расплавленного низкотемпературного материала. Процесс завершается после полного поглощения расплавленного слоя. Четвертый этап — гомогенизация, предназначен для снятия остаточного напряжения, вызванного термическим воздействием и изменением микроструктуры соединения с обеспечением однородности соединения, он представляет собой диффузию в твердом теле. Процесс диффузии присутствует во всех четырех этапах, но в последнем этапе после завершения процесса изотермического затвердевания он становится единственным механизмом реакции к однородности.

## 2. Эксперимент

В целях определения возможности применения технологии монтажа взаимной переходной диффузии для кристалльного производства был проведен эксперимент по нанесению многослойного покрытия Au—Sn—Au—Sn—Au, анализ полученной структуры, монтаж с ее применением. Проведение эксперимента состояло из трех этапов: этап 1 — исследование нанесенного многослойного покрытия Au—Sn на подложке сапфира; этап 2 — исследование нанесенного многослойного покрытия Au—Sn на подложке сапфира после термообработки; этап 3 — исследование результатов монтажа с помощью нанесенного многослойного покрытия Au—Sn.

### 2.1. Этап 1 — исследование нанесенного многослойного покрытия Au—Sn

Тестовая конструкция соединяющего слоя состоит из пяти последовательно напыленных слоев Au—Sn—Au—Sn—Au толщиной 1,0—1,0—1,0—1,0—0,3 мкм соответственно. В рамках данного исследования многослойное покрытие наносили как на подложку с адгезионным слоем титана (Ti) 0,15 мкм, так и на слой

Таблица 1

Фазовые состояния системы Au—Sn [12—14]

Фаза	Содержание олова, ат. %	Температура плавления, °C	Тепло-проводность, $\text{Вт} \cdot \text{м}^{-1} \cdot \text{К}^{-1}$	Электрическое сопротивление, $\Omega \cdot \text{см}$	$E$ , ГПа	$\alpha$ , $10^{-6}/\text{К}^{-1}$
$\alpha$ (Au)	0,0	1064	301	$2,35 \times 10^{-6}$	77,2	14,4
$\beta$ ( $\text{Au}_{10}\text{Sn}$ )	8,0	532			88	—
$\zeta$ ( $\text{Au}_{0,84-0,92}\text{Sn}_{0,16-0,08}$ )	10,9...16	522			58	20
$\zeta'$ ( $\text{Au}_5\text{Sn}$ )	16,7	190			76	18
80Au20Sn ( $\zeta + \delta$ )	29	278	57,3	$2,23 \times 10^{-5}$	69...74	16
$\delta$ ( $\text{AuSn}$ )	50...50,5	419	57		70...87	14
$\varepsilon$ ( $\text{AuSn}_2$ )	66,7	311			103	
$\eta$ ( $\text{AuSn}_4$ )	80	252			39	
Sn	100	232	63	$1,5 \times 10^{-5}$	41	22

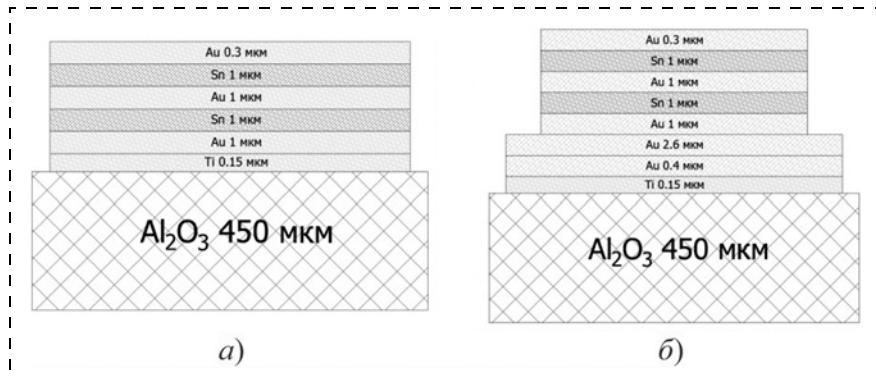


Рис. 4. Схематичное представление тестовых конструкций

золота 3,0 мкм. Тестовая конструкция реализована на подложке сапфира толщиной 450 мкм. Схематичное представление тестовых конструкций изображено на рис. 4. Важным аспектом является напыление указанных пленок в одном процессе, исключая контакт с воздухом, тем самым избегая образования оксида олова, присутствие которого сильно влияло бы на процесс плавления и последующего взаимодействия с золотом [22]. Отношение толщин золота и олова для получения соотношения по массе 80 на 20 требует соотношения по толщине 3:2. Избыток высокотемпературного металла обычно необходим, чтобы обеспечить вариации процесса и придать пластичность финальному соединению (чистый металл обычно более пластичный, чем интерметаллические соединения) [23].

**Электронная микроскопия сформированной системы слоев.** Анализ поперечного сечения является общепринятым методом исследования микроструктуры системы слоев и соединенных образцов. В данном исследовании проводили анализ поперечного сечения, как отдельных тестовых конструкций, так и смонтированных образцов. Было изготовлено более

10 пластин с тестовыми конструкциями. Подготовка образцов для анализа включала резку пластины на отдельные кристаллы размером 4 × 5,5 мм, шлифовку, полировку кристаллов и последующее травление. Исследование морфологии структур экспериментальных образцов проводили на сканирующем электронном микроскопе Zeiss Merlin compact VP-60-13. Фотография типичного поперечного сечения образца с нанесенной системой слоев представлена на рис. 5.

Электронная микроскопия позволила определить фактические значения толщин наносимых многослойных покрытий и их морфологии. На фотографии явно выражены пять последовательных слоев, в которых три слоя отличны от двух других. На фотографии представленного образца общая толщина структуры составила 4,7 мкм, а отдельных слоев — 1,2, 0,72, 1,6, 0,68, 0,6 мкм. Морфологии всех слоев золота, как и олова схожи друг с другом.

**Картирование по элементам методом энергодисперсионной рентгеновской спектроскопии сформированной системы слоев.** Исследование элементного состава образцов проводили с помощью сканирующего электронного микроскопа JEOL JSM-6490LV, оснащенного приставкой для энергодисперсионного рентгеновского микроанализа Oxford Instruments INCA Energy X-MAX20. Сочетание методов электронной микроскопии и энергодисперсионного анализа позволяет осуществлять картирование элементного состава многослойных покрытий с высоким пространственным разрешением. Область возбуждения атомов зависит от многих факторов: энергии электронного пучка, атомного номера элемента, сфокусированности пучка. Поглощение рентгеновского излучения также зависит от материала образца. Ввиду сложности анализа всех факторов данный метод применяют для анализа относительного содержания элементов и он не подходит для измерения количественных величин.

Рентгенофлуоресцентное энергодисперсионное картирование сечения покрытия (рис. 6, см. третью сторону обложки) позволило визуализировать распределение элементов Au (желтый маркер) и Sn (розовый маркер). Из рис. 6 видно, что нанесенная система состоит из пяти слоев, в которых три слоя — напыление Au, а два — напыление Sn. Точечный анализ указывает на присутствие в слоях олова доли золота около 50 ат. %. Диффузия золота в олово при формировании системы слоев связана с температурными режимами при напылении.

**Рентгеноструктурный и рентгенофазовый анализ сформированной системы слоев.** Рентгеноструктурный и рентгенофазовый анализы образцов проводили с помощью рентгеновского дифрактометра ДРОН-8 (Дифрактометр рентгеновский общего назначения, АО "ИЦ "Буревестник") с кобальтовым анодом (СоКа).

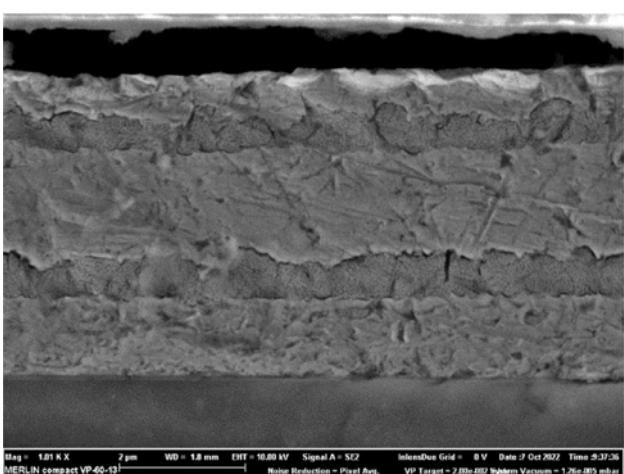


Рис. 5. Фотография поперечного сечения образца с системой слоев Au—Sn

Для выполнения рентгенофазового анализа использованы программа "Crystallographica Search-Match Version 3, 1, 0, 0 Copyright © 1996–2008, Oxford Cryo-systems" и база данных эталонных рентгенограмм "ICDD PDF-2" (2014 г.). В целях определения фаз использовали программу качественного рентгеноструктурного анализа "Синус Тета" путем наложения интенсивностей пиков, получаемых в ходе процесса исследования, на базовые эталонные рентгенограммы.

На рис. 7 (см. третью сторону обложки) представлена дифрактограмма образца  $\text{Al}_2\text{O}_3$  (сапфир) с нанесенной системой слоев Ti—Au—Sn—Au—Sn—Au. Черным маркером обозначена подложка из сапфира, с характерной ориентацией по плоскости (012) и параллельной ей плоскости (024). Фиолетовым маркером обозначены идентифицированные слои Au с кубической решеткой. Также в образце были обнаружены интерметаллические соединения  $(\text{Au}_9\text{Sn})_{0,2}$  и AuSn — темно-оранжевый и зеленый маркеры соответственно. В круглых скобках на дифрактограмме обозначены плоскости кристаллических решеток, рефлексы которых были зарегистрированы детектором.

В ходе проведенного исследования чистой фазы Sn на дифрактограмме образца не было обнаружено. Что может быть связано с взаимодействием при процессе нанесения металлизации Au с Sn, их взаимной диффузией друг в друга с образованием интерметаллических соединений с гексагональными решетками  $(\text{Au}_9\text{Sn})_{0,2}$  и AuSn структуры юаньджиангита. Чистую фазу Ti не удалось идентифицировать в связи с малой толщиной покрытия (100 нм), которую проблематично выделить из фона для регистрации данным методом.

Результаты анализа с идентифицированными фазами, структурой, кристаллографической группой симметрии (сингонии) и соответствующими основными межплоскостными расстояниями ( $d_1$ ,  $d_2$ ,  $d_3$ ) также приведены в табл. 2.

## 2.2. Этап 2 — исследование нанесенного многослойного покрытия Au—Sn на подложке сапфира после термообработки

В целях имитации процесса монтажа по технологии взаимной переходной диффузии была проведена термообработка полученной многослойной структуры на подложке с нагревом от комнатной температуры до 320 °C в течение 300 с, далее — выдержка 600 с

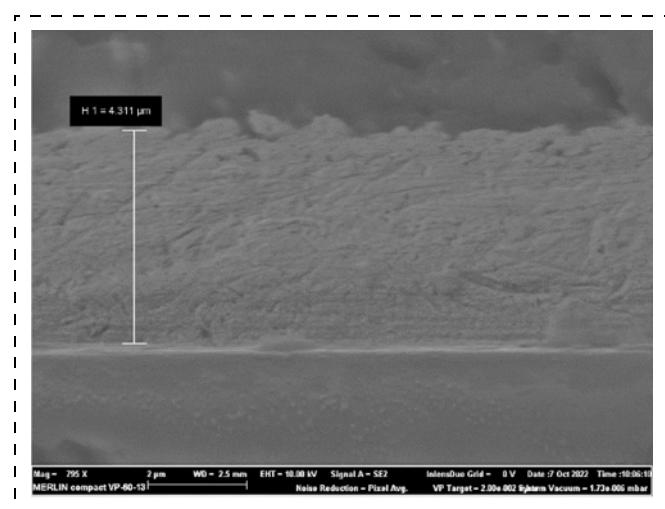


Рис. 8. Фотография поперечного сечения образца с системой слоев Au—Sn после термообработки

с последующим охлаждением до комнатной температуры в течение 600 с. Термообработку проводили в защитной среде  $\text{N}_2$ .

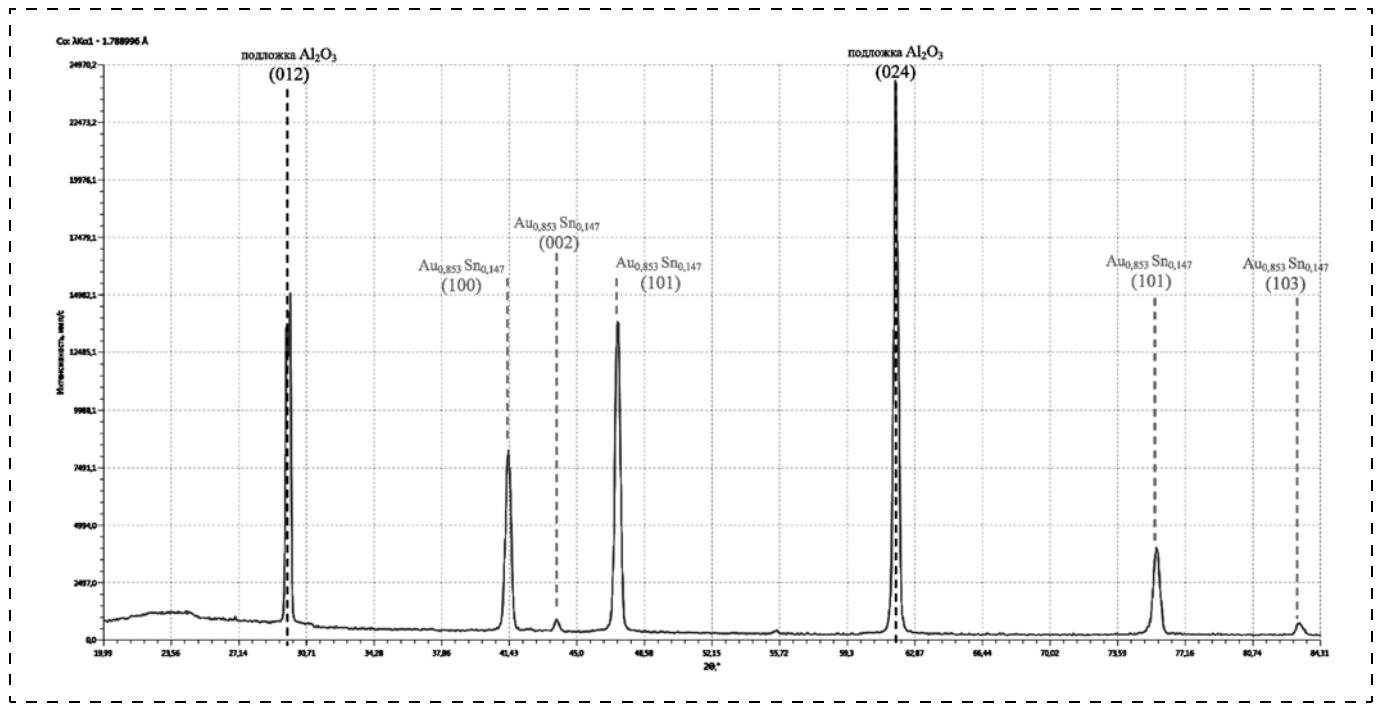
**Электронная микроскопия сформированной системы слоев после термообработки.** После имитации процесса монтажа была повторно проведена электронная микроскопия образца с покрытием. На рис. 8 представлена фотография шлифа образца, на которой визуально наблюдается однослойное, однофазное и однородное покрытие общей толщиной 4,3 мкм. Результаты электронной микроскопии позволяют сделать вывод об образовании единого интерметаллического соединения между Au и Sn. Имеет место уменьшение общей толщины вследствие уменьшения объема при образовании интерметаллических соединений.

**Картирование по элементам методом энергодисперсионной рентгеновской спектроскопии сформированной системы слоев после термообработки.** Картирование элементного состава сечения системы металлов после термообработки (рис. 9, см. третью сторону обложки) позволило визуализировать распределение элементов Au (желтый маркер) и Sn (розовый маркер). Из рис. 9 видно равномерное распределение элементов по всему сечению покрытия. Точечный анализ свидетельствует о разбросе концентрации олова в пределах от 14,5 до 15,9 ат. % по площади сече-

Таблица 2

Обнаруженные фазы образца сапфира с нанесенной системой металлизации

№	№ карточки рентгенограммы	Химическая формула	Название	Сингония	$d_1$ , Å	$d_2$ , Å	$d_3$ , Å
1	01-073-6190	$\text{Al}_2\text{O}_3$ (подложка)	Corundum	Rhombohedral	2,5528	2,0871	1,6027
2	01-071-5019	AuSn	Yuanjiangite	Hexagonal	2,2221	2,1609	3,7428
3	01-077-7004	$(\text{Au}_9\text{Sn})_{0,2}$	Gold Tin	Hexagonal	2,2287	2,393	2,5185
4	03-065-8601	Au	Gold	Cubic	2,3510	2,0360	1,2278



**Рис. 10.** Дифрактограмма образца сапфира с нанесенной системой металлизации Ti—Au—Sn—Au—Sn—Au после термообработки

ния. Средняя концентрация олова по сечению составила 15 ат. %.

**Рентгеноструктурный и рентгенофазовый анализ сформированной системы слоев после термообработки.** Рентгеноструктурный и рентгенофазовый анализы образца сапфира с нанесенной системой металлизации Ti—Au—Sn—Au—Sn—Au после термообработки также проводили по аналогичной схеме, как приведено в разд. 2.1.

Полученная дифрактограмма образца представлена на рис. 10, из которой видно, что после проведения термообработки (320 °C, выдержка 10 мин), на подложке монокристаллического  $\text{Al}_2\text{O}_3$  образуется единый интерметаллид  $\text{Au}_{0.853}\text{Sn}_{0.147}$  из системы нанесенных покрытий, что подтверждается проведенными исследованиями энергодисперсионным методом с однородным распределением в сплаве элементов Au и Sn по всей толщине покрытия.

Результаты анализа с идентифицированными фазами, структурой, кристаллографической группой симметрии (сингонией), и соответствующими основными межплоскостными расстояниями также приведены в табл. 3.

Сравнительный анализ дифрактограмм показывает отличие фаз в образце до и после термообработки.  $\text{AuSn}$ ,  $(\text{Au}_9\text{Sn})_{0.2}$  и Au претерпевают диффузионное превращение с образованием отдельной новой  $\zeta$  фазы  $\text{Au}_{0.853}\text{Sn}_{0.147}$ , что подтверждается изменением межплоскостных расстояний по основным плоскостям фазы (100) и (101) на 0,0107 и 0,0163 Å соответственно по сравнению с аналогичными плоскостями в фазе  $(\text{Au}_9\text{Sn})_{0.2}$  до термообработки.

### 2.3. Этап 3 — исследование результатов монтажа с помощью нанесенного многослойного покрытия Au—Sn

В качестве соединяемых образцов были использованы два кристалла на подложках сапфира. Первый кристалл с гальваническим покрытием Au 3 мкм, с вспомогательными слоями Ti и Ni по 0,1 мкм, второй кристалл со сформированным соединяющим слоем из пяти последовательно напыленных слоев Au и Sn, с адгезионным слоем титана 0,15 мкм. Схематичное представление соединяемых кристаллов представлено на рис. 11.

Таблица 3

Обнаруженные фазы образца сапфира с нанесенной системой металлизации после термообработки

№	№ карточки рентгенограммы	Химическая формула	Название	Сингония	$d_1$ , Å	$d_2$ , Å	$d_3$ , Å
1	01-073-6190	$\text{Al}_2\text{O}_3$	Corundum	Rhombohedral	2,5528	2,0871	1,6027
2	01-074-6471	$\text{Au}_{0.853}\text{Sn}_{0.147}$	Gold Tin	Hexagonal	2,2394	2,3898	2,5348



Рис. 11. Схематичное представление монтажа кристаллов

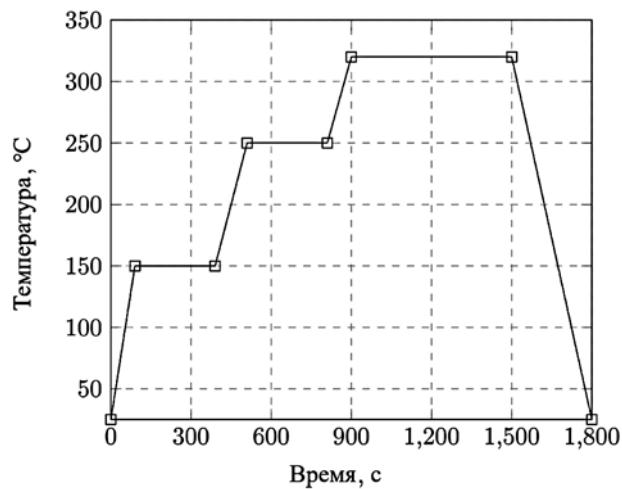


Рис. 12. Температурный режим монтажа кристаллов

Монтаж кристаллов проводили по режиму термообработки согласно профилю, представленному на рис. 12. Температурный режим состоит из семи этапов: 1-й этап — нагрев до 150 °C в течение 90 с; 2-й — стабилизация при температуре 150 °C в течение 300 с. На стадии стабилизации происходит минимизация градиентов температур всех областей образцов. 3-й этап — нагрев до 250 °C в течение 120 с; 4-й — выдержка при температуре 250 °C в течение 300 с; 5-й — нагрев до 320 °C в течение 90 с; 6-й — выдержка в течение 600 с при 320 °C; 7-й — охлаждение до комнатной температуры в течение 300 с. Давление при процессе составляло 5 МПа. Монтаж проходил в условной защитной среде, образцы обдували потоком  $\text{N}_2$ .

**Электронная микроскопия смонтированных образцов.** Морфология области соединения кристаллов бы-

ла проанализирована на сканирующем электронном микроскопе. Подготовка образцов для анализа включала шлифовку и полировку сборки с последующим травлением. Фотография поперечного сечения соединения представлена на рис. 13.

Из фотографии видно, что соединение в определенных местах имеет два вида дефектов: пустоты и наличие локальных границ раздела двух поверхностей (*unbonded-like line*) [24]. Пустоты, типичные для монтажа методом взаимной переходной диффузии, могли в основном быть причиной уменьшения объема при образовании интерметаллических соединений. Одним из вариантов решения данных проблем является увеличение давления при монтаже. Давление при монтаже приводит к уплотнению вследствие дополнительного вклада внутренних сил для спекания.

**Картирование по элементам методом энергодисперсионной рентгеновской спектроскопии смонтированных образцов.** Результаты картирования элементного состава поперечного сечения области соединения кристаллов представлены на рис. 14 (см. четвертую сторону обложки). Точечный анализ показал градиент концентрации олова по сечению. По области первого кристалла (с системой Ti—Ni—Au) соотношение варьируется от 2,5 до 13 ат. %. По области второго кристалла (с системой Au—Sn) — от 12,7 до 20 ат. % с максимумом в зоне, близкой к контакту с первым кристаллом. Среднее отношение олова к золоту по поперечному сечению соединения составляет 10,7 ат. %. Данные энергодисперсионной рентгеновской спектроскопии позволяют предположить, что область соединения состоит из фаз чистого золота,  $\zeta(\text{Au}_{0,84-0,92}\text{Sn}_{0,16-0,08})$  и небольшой доли  $\delta(\text{AuSn})$ .

**Исследование прочности соединения монтируемых образцов.** Количественные данные по прочности соединения методом взаимной переходной диффузии получены по тесту разрыва соединения на сдвиг. Испытания проводили на установке тестирования микросоединений Nordson Dage 4000Plus. Габаритные

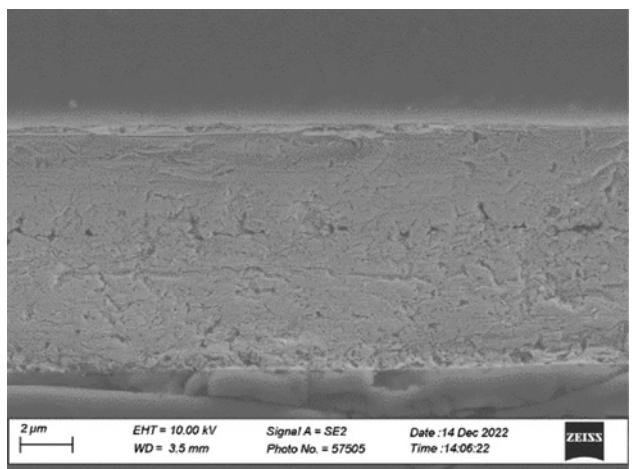


Рис. 13. Фотография поперечного сечения соединяемых кристаллов

размеры монтируемых образцов —  $250 \times 250$  мкм толщиной 300 мкм. Испытаны три образца. Значения по прочности составили 43,8, 32 и 20,8 МПа соответственно. Средний показатель — 32,2 МПа. Разброс по значениям прочности соединения может быть объяснен возможной разницей площади контакта вследствие проблем с плоскостью, образованием пустот, наблюдавшихся ранее при анализе поперечного сечения соединения.

Экспериментальные данные по прочности монтажа с исследуемым соединяющим слоем также представлены в работе, посвященной интеграции  $A^3B^5$  кристаллов методом перевернутого монтажа [25]. В указанной публикации система соединяющего слоя и режим монтажа идентичны с применяемыми в данной работе. Средняя прочность соединения составила 57,4 МПа. Образцы выдержали испытания, включающие чередующиеся механические удары 1800 г и климатическое воздействие (термоцикли —60 °C и +200 °C). Улучшенные значения по прочности соединения могут быть связаны с уменьшением площадью контакта, следовательно, меньшим влиянием аспекта плоскопараллельности при монтаже.

### 3. Выводы

Цель данной работы — исследование и разработка технологии формирования соединительного слоя для МИС СВЧ с применением системы слоев Au—Sn, сформированных на этапе производства пластины. Последовательная система чередующихся металлов золота и олова из пяти слоев была реализована напылением металлических пленок с общей концепцией Au—Sn—Au—Sn—Au, толщиной 1,0—1,0—1,0—1,0—0,3 мкм соответственно.

Исследованы морфологические и фазовые характеристики сформированной системы до и после тепловой обработки. Из начальной сформированной системы слоев состоит из чистого Au,  $(Au_9Sn)_{0,2}$  и AuSn. В результате термообработки системы металлов Au—Sn на подложке при температуре 320 °C при выдержке 10 мин образуется единый однородный слой, состоящий из одной фазы  $\zeta$   $Au_{0,853}Sn_{0,147}$ . Имеет место уменьшение общей толщины системы слоев вследствие уменьшения объема при образовании интерметаллических соединений. Результаты анализа показали, что в исследуемой системе Au—Sn из пяти последовательных слоев процесс гомогенизации завершается за 10 мин. Фаза  $\zeta$ , из которой состоит система после термообработки, имеет температуру плавления 522 °C, что обеспечивает высокую температурную стабильность соединяющего слоя.

Исследованы микроструктура, элементный состав и начальные механические свойства соединения. Микроструктура поперечного сечения соединения не содержит выраженных неоднородностей и отдельных морфологий, однако в определенных местах имеет два вида дефектов: пустоты и наличие локальных границ раздела двух поверхностей. Результаты энергодисперсионного анализа поперечного сечения соединения

показывают, что среднее соотношение олова к золоту по поперечному сечению соединения составляет 10,7 ат. %. Комплекс проведенных исследований позволяет предположить, что соединение в большей степени включает фазу  $\zeta$ , что обеспечит наилучшие характеристики по механической прочности среди фаз с высоким содержанием золота.

Прочность соединения кристаллов, а также стойкость к внешним воздействующим факторам демонстрируют результаты, показывающие перспективность использования данной технологии в космическом применении.

Технология монтажа методом взаимной переходной диффузии обеспечивает:

- формирование соединяющего слоя на этапе изготовления пластины;
- локальность соединения с возможным шагом менее 10 мкм;
- температуру при монтаже 280...320 °C;
- высокотемпературную стабильность (выше температуры монтажа);
- толщины соединения от десятых долей до единиц микрометров;
- прочное соединение, стойкое к внешним воздействующим факторам.

Направление дальнейших исследований включает в себя оптимизацию соотношения формируемых слоев и режимов монтажа для уменьшения времени монтажа и увеличения прочности соединения, а также экспериментальные оценки тепловых и электрических характеристик соединяющего слоя из системы слоев Au—Sn.

### Заключение

В данной работе рассмотрена технология монтажа методом взаимной переходной диффузии Au—Sn, совместимая с существующими полупроводниковыми технологиями изготовления  $A^3B^5$  кристаллов, таких как GaAs, GaN на кремнии или карбиде кремния.

Монтаж взаимной переходной диффузии обеспечивает интеграцию кристалла к кристаллу, близкую к монолитной, одновременно обеспечивая преимущества гибридно-монолитной конструкции, в том числе возможность применения разных полупроводниковых технологий — гетерогенной интеграции.

### Список литературы

1. Pengelly R. S., Wood S. M., Milligan J. W., Sheppard S. T. et al. A Review of GaN on SiC High Electron-Mobility Power Transistors and MMICs // IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques. 2012. Vol. 60, N. 6. P. 1764—1783.
2. Bajwa A. A., Qin Y., Reiner R., Quay R. et al. Assembly and Packaging Technologies for High-Temperature and High-Power GaN Devices // IEEE Trans. Compon., Packag. Manufact. Technol. 2015. Vol. 5, N. 10. P. 1402—1416.
3. Manikam V. R., Cheong, K. Y. Die Attach Materials for High Temperature Applications: A Review // IEEE Transactions on Components, Packaging and Manufacturing Technology. 2011. Vol. 1, N. 4. P. 457—478.

4. Samanta K. K. PA Thermal Management and Packaging: Wideband PA and Packaging, History, and Recent Advances: Part 2 // IEEE Microwave Magazine. 2016. Vol. 17, N. 11. P. 73–81.
5. Heinrich W., Hossain M., Sinha S., Schückle F.-J. et al. Connecting Chips With More Than 100 GHz Bandwidth // IEEE Journal of Microwaves. 2021. Vol. 1, N. 1. P. 364–373.
6. Heinrich W. The flip-chip approach for millimeter wave packaging // IEEE Microwave Magazine. 2005. Vol. 6, N. 3. P. 36–45.
7. Kazior T. E., Atkins H. N., Fatemi A., Chen Y. et al. DBIT-direct backside interconnect technology: a manufacturable, bond wire free interconnect technology for microwave and millimeter wave MMICs // 1997 IEEE MTT-S International Microwave Symposium Digest, Denver, CO, USA. 1997. Vol. 2. P. 723–726.
8. Schmucke F. J., Jentzsch A., Gassler C., Marschall P. et al. 40 GHz hot-via flip-chip interconnects // IEEE MTT-S International Microwave Symposium Digest, Philadelphia, PA, USA, 2003. P. 1167–1170.
9. Gutierrez-Aitken A., Wu B. Y.-C., Scott D., Sato K. et al. A Meeting of Materials: Integrating Diverse Semiconductor Technologies for Improved Performance at Lower Cost // IEEE Microwave Magazine. 2017. Vol. 18, N. 2. P. 60–73.
10. Elsherbini A., Liff S., Swan J., Jun K. et al. Hybrid Bonding Interconnect for Advanced Heterogeneously Integrated Processors // 2021 IEEE 71st Electronic Components and Technology Conference (ECTC), San Diego, CA, USA. 2021. P. 1014–1019.
11. Okamoto H. Au–Sn (Gold-Tin) // Journal of Phase Equilibria and Diffusion. 2007. Vol. 28, N. 5. P. 490.
12. Ramm P., Lu J.-Q., Taklo M. M. V. Handbook of Wafer Bonding. Wiley-VCH, 2012. P. 395.
13. Chromik R. R., Wang D. N., Shugar A., Limata L. et al. Mechanical properties of intermetallic compounds in the Au–Sn system // Journal of Materials Research. 2005. Vol. 20, N. 8. P. 2161–2172.
14. Tollefse T. A., Larsson A., Løvvik O. M., Aasmundtveit K. Au–Sn SLID Bonding—Properties and Possibilities // Metallurgical and Materials Transactions B. 2012. Vol. 43. P. 397–405.
15. Bernstein L. Semiconductor joining by the solid-liquid-interdiffusion (SLID) process // Journal of the Electrochemical Society. 1966. Vol. 113, N. 12. P. 1282–1288.
16. Paulon D. F., Duavall D. S., Owczarski W. A. Diffusion Bonding Utilizing Transient Liquid Phase, Patent US3678570, July 25th, 1972.
17. Johnson R. W., Wang C., Liu Y., Scofield J. D. Power Device Packaging Technologies for Extreme Environments // IEEE Transactions on Electronics Packaging Manufacturing. 2007. Vol. 30, N. 3. P. 182–193.
18. Wang T. B., Shen Z. Z., Ye R. Q., Xie X. M. et al. Die bonding with Au/In isothermal solidification technique // Journal of Electronic Materials. 2000. Vol. 29, N. 4. P. 443–447.
19. Siow K. Die-Attach Materials for High Temperature Applications in Microelectronics Packaging. Springer Cham., 2019. 279 p.
20. Larsson A., Tollefse T. A., Aasmundtveit K. E. Ni-Sn solid liquid interdiffusion (SLID) bonding — Process, bond characteristics and strength // 2016 6th Electronic System-Integration Technology Conference (ESTC). 2016. P. 1–6.
21. Cook G. O., Sorensen C. D. Overview of transient liquid phase and partial transient liquid phase bonding // Journal of Materials Science. 2011. Vol. 46, N. 16. P. 5305–5323.
22. Nishiguchi M., Goto N., Nishizawa H. Highly reliable Au-Sn eutectic bonding with background GaAs LSI chips // IEEE Transactions on Components, Hybrids, and Manufacturing Technology. 1991. Vol. 14, N. 3. P. 523–528.
23. Jentzsch A., Heinrich W. Theory and measurements of flip-chip interconnects for frequencies up to 100 GHz // IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques. 2001. Vol. 49, N. 5. P. 871–878.
24. Mokhtari O. A review: Formation of voids in solder joint during the transient liquid phase bonding process — Causes and solutions // Microelectronics Reliability. 2019. Vol. 98. P. 95–105.
25. Efimov A. S., Temnov A. M., Korolkova D. D., Zaycev A. A. et al. Flip-Chip Integration of III-V Chips on Wafer for mmW Applications // 2022 IEEE 8th All-Russian Microwave Conference (RMC), Moscow, Russian Federation. 2022.

**A. S. Efimov<sup>1</sup>**, Engineer, e-mail: easmov@gmail.com, **A. M. Temnov<sup>1</sup>**, Senior researcher, **A. A. Zaycev<sup>2</sup>**, Senior researcher, **D. D. Korolkova<sup>1</sup>**, Process engineer, **A. N. Pashkov<sup>1</sup>**, Deputy-Head of Scientific-Production Complex, **T. M. Esipova<sup>1</sup>**, Engineer, **N. A. Sharapov<sup>1</sup>**, Engineer, **K. V. Dudinov<sup>1</sup>**, Deputy-Head of Scientific-Production Complex, **A. S. Kurochka<sup>1</sup>**, Engineer, **R. G. Belov<sup>1</sup>**, Process engineer

<sup>1</sup> JSC RPC "Istok" named after Shokin", Vokzalnaya Str., 2A, Moscow Region, Fryazino, 141190, Russia

<sup>2</sup> National Research University of Electronic Technology, Shokin Square, 1, MIET, Moscow, Zelenograd, 124498, Russia

*Corresponding author:*

**Efimov Alexander S.**, Engineer, JSC RPC "Istok" named after Shokin", Vokzalnaya Str., 2A, Moscow Region, Fryazino, 141190, Russia, e-mail: easmov@gmail.com

## Wafer-Level Au-Sn Solid-Liquid Interdiffusion Bonding for Microwave Applications

Received on April 17, 2023  
Accepted on May 22, 2023

*Future compact integration of microwave modules will require intermetallic bonding with pitch connections lower than 10  $\mu\text{m}$ . Solid-liquid interdiffusion (SLID) bonding is a potential bonding method for close heterogeneous integration because of its bonding temperature in the range of solder bonding, its ability to withstand higher temperatures than bonding and its moderate compatibility with the joining of rough surfaces.*

This paper presents the results of an investigation of the Au—Sn system for integration of  $A^3B^5$  chips on wafer level using SLID bonding. A sequence of five layers of Au and Sn with weight ratios of about 3:2 was deposited on a sapphire substrate. The structure and phases of the obtained system were investigated before and after annealing. The initial system has five distinctive alternating layers with an overall thickness of around 4.5  $\mu\text{m}$ . After heat treatment at 320 °C with a holding time of 10 minutes, the Au—Sn system transforms into one layer that consists of only one phase  $\zeta$  ( $\text{Au}_{0.853}\text{Sn}_{0.147}$ ). The homogenization process is completed in less than 10 minutes. The  $\zeta$  phase, of which the system is composed after annealing, has a melting point of 522 °C, which ensures the high temperature stability of the bonding layer. Bonding using the formed system was conducted. Morphology, elemental composition, and the initial mechanical properties of bonded structures have been studied. There are two types of defects in the joint's cross section: voids and the presence of local interfaces between two surfaces (an unbonded-like line). EDX analysis of the cross section of the joint between two crystals shows that the average ratio of Sn to Au over the cross section of the joint is 10.7 %. The complex of studies conducted suggests that the bonding area mostly includes the  $\zeta$  phase, which will provide the best mechanical strength characteristics among the phases with a high Au concentration. The average bond shear strength is 32 MPa. Initial robustness results of the bonding are promising for space applications.

**Keywords:** SLID, Au—Sn, interconnection, bonding, compound semiconductors, microwave application, heterogeneous integration

For citation:

**Efimov A. S., Temnov A. M., Zaycev A. A., Korolkova D. D., Pashkov A. N., Esipova T. M., Sharapov N. A., Dudinov K. V., Kurochka A. S., Belov R. G.** Wafer-Level Au-Sn Solid-Liquid Interdiffusion Bonding for Microwave Applications, *Nano- i mikrosistemnaya tekhnika*, 2023, vol. 25, no. 4, pp. 171–180.

DOI: 10.17587/nmst.20.171-180

## References

1. Pengelly R. S., Wood S. M., Milligan J. W., Sheppard S. T. et al. A Review of GaN on SiC High Electron-Mobility Power Transistors and MMICs, *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*. 2012, vol. 60, no. 6, pp. 1764–1783.
2. Bajwa A. A., Qin Y., Reiner R., Quay R. et al. Assembly and Packaging Technologies for High-Temperature and High-Power GaN Devices, *IEEE Trans. Compon., Packag. Manufact. Technol.* 2015, vol. 5, no. 10, pp. 1402–1416.
3. Manikam V. R., Cheong K. Y. Die Attach Materials for High Temperature Applications: A Review, *IEEE Transactions on Components, Packaging and Manufacturing Technology*. 2011, vol. 1, no. 4, pp. 457–478.
4. Samanta K. K. PA Thermal Management and Packaging: Wideband PA and Packaging, History, and Recent Advances: Part 2, *IEEE Microwave Magazine*. 2016, vol. 17, no. 11, pp. 73–81.
5. Heinrich W., Hossain M., Sinha S., Schückle F.-J. et al. Connecting Chips With More Than 100 GHz Bandwidth, *IEEE Journal of Microwaves*. 2021, vol. 1, no. 1, pp. 364–373.
6. Heinrich W. The flip-chip approach for millimeter wave packaging, *IEEE Microwave Magazine*. 2005, vol. 6, no. 3, pp. 36–45.
7. Kazior T. E., Atkins H. N., Fatemi A., Chen Y. et al. DBIT-direct backside interconnect technology: a manufacturable, bond wire free interconnect technology for microwave and millimeter wave MMICs, *1997 IEEE MTT-S International Microwave Symposium Digest, Denver, CO, USA*. 1997, vol. 2, pp. 723–726.
8. Schmucke F. J., Jentzsch A., Gassler C., Marschall P. et al. 40 GHz hot-via flip-chip interconnects, *IEEE MTT-S International Microwave Symposium Digest, 2003, Philadelphia, PA, USA*. 2003, pp. 1167–1170.
9. Gutierrez-Aitken A., Wu B. Y. -C., Scott D., Sato K. et al. A Meeting of Materials: Integrating Diverse Semiconductor Technologies for Improved Performance at Lower Cost, *IEEE Microwave Magazine*. 2017, vol. 18, no. 2, pp. 60–73.
10. Elsherbini A., Liff S., Swan J., Jun K. et al. Hybrid Bonding Interconnect for Advanced Heterogeneously Integrated Processors, *2021 IEEE 71st Electronic Components and Technology Conference (ECTC), San Diego, CA, USA*, 2021, pp. 1014–1019.
11. Okamoto H. Au—Sn (Gold-Tin), *Journal of Phase Equilibria and Diffusion*. 2007, vol. 28, no. 5, p. 490.
12. Ramm P., Lu J.-Q., Taklo M. M. V. Handbook of Wafer Bonding, Wiley-VCH, 2012. 395 p.
13. Chromik R. R., Wang D. N., Shugar A., Limata L. et al. Mechanical properties of intermetallic compounds in the Au—Sn system, *Journal of Materials Research*, 2005, vol. 20, no. 8, pp. 2161–2172.
14. Tollesen T. A., Larsson A., Løvik O. M., Aasmundtveit K. Au-Sn SLID Bonding—Properties and Possibilities, *Metallurgical and Materials Transactions B*, 2012, vol. 43, pp. 397–405.
15. Bernstein L. Semiconductor joining by the solid-liquid-interdiffusion (SLID) process, *Journal of the Electrochemical Society*, 1966, vol. 113, no. 12, pp. 1282–1288.
16. Paulonis D. F., Duavall D. S., Owczarski W. A. Diffusion Bonding Utilizing Transient Liquid Phase, Patent US3678570, July 25th, 1972.
17. Johnson R. W., Wang C., Liu Y., Scofield J. D. Power Device Packaging Technologies for Extreme Environments / *IEEE Transactions on Electronics Packaging Manufacturing*. 2007, vol. 30, no. 3, pp. 182–193.
18. Wang T. B., Shen Z. Z., Ye R. Q., Xie X. M. et al. Die bonding with Au/In isothermal solidification technique, *Journal of Electronic Materials*, 2000, vol. 29, no. 4, pp. 443–447.
19. Siow, K. Die-Attach Materials for High Temperature Applications in Microelectronics Packaging, Springer Cham, 2019, p. 279.
20. Larsson A., Tollesen T. A., Aasmundtveit K. E. Ni-Sn solid liquid interdiffusion (SLID) bonding — Process, bond characteristics and strength // *2016 6th Electronic System-Integration Technology Conference (ESTC)*. 2016, pp. 1–6.
21. Cook G. O., Sorensen C. D. Overview of transient liquid phase and partial transient liquid phase bonding, *Journal of Materials Science*, 2011, vol. 46, no. 16, pp. 5305–5323.
22. Nishiguchi M., Goto N., Nishizawa H. Highly reliable Au-Sn eutectic bonding with background GaAs LSI chips, *IEEE Transactions on Components, Hybrids, and Manufacturing Technology*. 1991, vol. 14, no. 3, pp. 523–528.
23. Jentzsch A., Heinrich W. Theory and measurements of flip-chip interconnects for frequencies up to 100 GHz, *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*. 2001, vol. 49, no. 5, pp. 871–878.
24. Mokhtari O. A review: Formation of voids in solder joint during the transient liquid phase bonding process — Causes and solutions, *Microelectronics Reliability*, 2019, vol. 98, pp. 95–105.
25. Efimov A. S., Temnov A. M., Korolkova D. D., Zaycev A. A. et al. Flip-Chip Integration of III—V Chips on Wafer for mmW Applications, *2022 IEEE 8th All-Russian Microwave Conference (RMC), Moscow, Russian Federation*. 2022, pp. 220–222.

# МОДЕЛИРОВАНИЕ И КОНСТРУИРОВАНИЕ МНСТ MODELLING AND DESIGNING OF MNST

УДК 621.372.543.2

DOI: 10.17587/nmst.25.181-188

**А. С. Койгеров**, канд. техн. наук, доцент, a.koigerov@gmail.com,  
Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет "ЛЭТИ"  
им. В. И. Ульянова (Ленина), 197376, Санкт-Петербург

## ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ МОДИФИЦИРОВАННОЙ МОДЕЛИ СВЯЗАННЫХ МОД И ЕЕ ФОРМАЛИЗАЦИИ НА ОСНОВЕ Р-МАТРИЦ ПРИ РАСЧЕТЕ ЧАСТОТНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ФИЛЬТРОВ НА ПАВ

Поступила в редакцию 07.04.2023

Показано современное состояние аналитического подхода к расчету фильтров на ПАВ на основе модифицированной модели связанных мод и формализации данного подхода на базе Р-матриц. Теоретически рассчитаны и представлены основные характеристики Р-матриц на примере резонаторного фильтра на вытекающих ПАВ на 64° YX-срезе ниобата лития. Фильтр имеет относительную полосу пропускания 5 %, вносимые потери — 1,2 dB и подавление в полосе заграждения — 40 dB. Проведено сопоставление результатов расчетных и экспериментальных частотных характеристик фильтра. Предложенный аналитический подход проектирования полосовых фильтров на ПАВ позволяет быстро и относительно точно прогнозировать частотные характеристики на стадии моделирования, тем самым уменьшить число экспериментальных итераций и повысить эффективность разработки.

**Ключевые слова:** поверхностные акустические волны, встречно-штыревой преобразователь, фильтр на ПАВ, модель связанных мод, СОМ-метод, пьезоэлектрическая подложка, сильный пьезоэлектрический материал, ниобат лития

### Введение

Проектирование устройств на поверхностных акустических волнах (ПАВ) — одно из актуальных направлений функциональной электроники, в частности акустоэлектроники. Так, фильтры на ПАВ [1, 2] являются ключевыми элементами современных систем связи, а радиоидентификаторы (метки) [3] и беспроводные датчики [4] на ПАВ решают задачи идентификации и измерения параметров окружающей среды для различных приложений, как для систем промышленной автоматизации, так и для отдельных автономных датчиков.

Проектирование фильтров на ПАВ представляет собой сложную техническую задачу. Например, синтез LC-фильтров и фильтров, в основе которых лежат эквивалентные LC-элементы, достаточно хорошо известен. Имеется обширная справочная литература, которая содержит данные о фильтрах различных

порядков, и существует специализированное программное обеспечение по синтезу и расчету фильтров, например, AWR Microwave Office и HFSS (High Frequency Structural Simulator). Процедура расчета фильтра сводится к выбору типа и порядка фильтра. В свою очередь, для фильтров на ПАВ отсутствуют унифицированные подходы и программы по расчету, каждый разработчик в силу своих возможностей осваивает тот или иной подход по моделированию и пользуется собственными программами по расчету. Единственным, более-менее унифицированным подходом можно назвать подход на основе метода конечных элементов (МКЭ) [5, 6], особенно, если он привязан к одному из пакетов по моделированию. Самые популярные пакеты на сегодняшний день — это COMSOL и ANSYS. В этом случае необходимы значительные временные затраты и ресурсы компьютера, и хотя продолжительность расчета зависит от различных параметров модели, но уйти от большого чис-

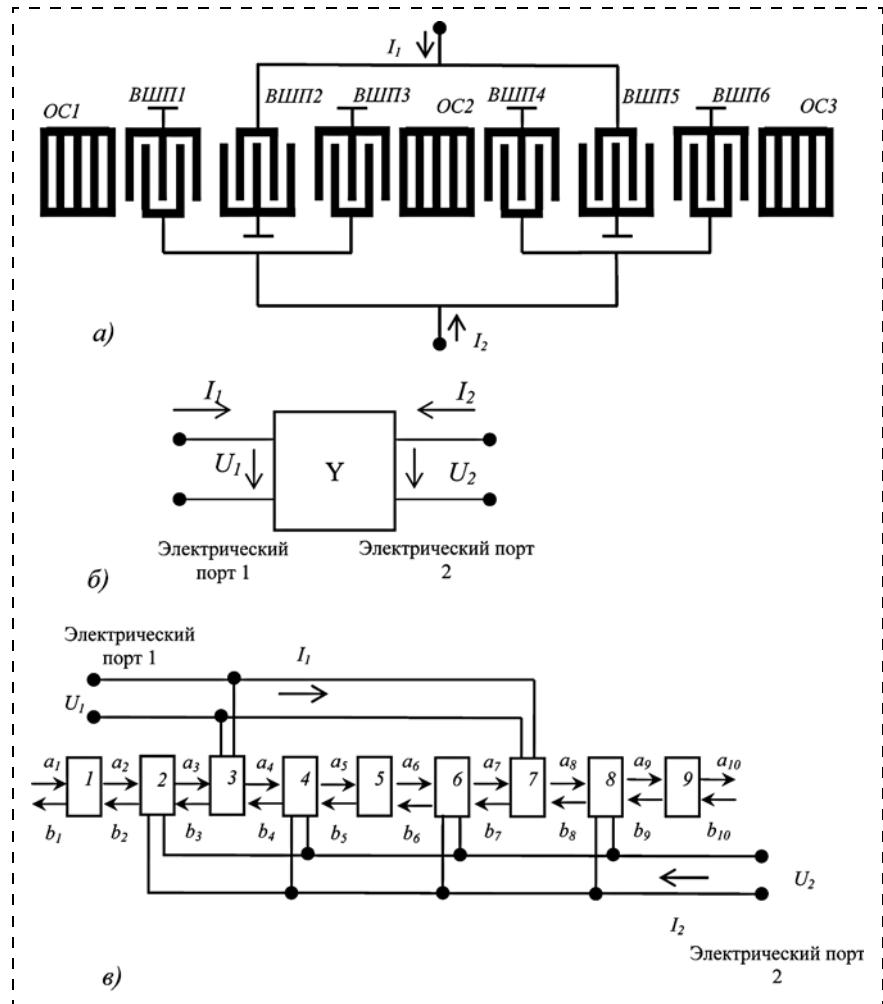
ла конечных элементов сетки без потери точности оценки и увеличения погрешности не получится. Вместе с тем, для расчета рабочих характеристик можно использовать хорошо зарекомендовавшие себя быстрые эффективные аналитические методы, такие как метод эквивалентных схем (МЭС) [7], модель связанных мод (МСМ) [8–10] и ряд дискретных моделей [11, 12].

Одним из известных методов расчета устройств на ПАВ является МСМ (COM model — coupling of modes model). Метод позволяет рассчитывать характеристики устройств с различными топологиями, содержащими как встречно-штыревые преобразователи (ВШП), так и отражательные структуры (ОС). Существующие ограничения подхода на основе МСМ связаны с учетом "вторичных" эффектов [13] и необходимости определения ключевых параметров акустических волн [14].

Цель работы — показать современное состояние и основные особенности расчета полосовых фильтров (ПФ) на ПАВ на основе модифицированной модели связанных мод и ее формализации на базе теории  $P$ -матриц. В качестве образца, на базе которого будет проходить сравнение результатов расчета и эксперимента, выбрана конструкция двухмодового фильтра на подложке 64° YХ-среза ниобата лития, где в качестве основного типа волны используется вытекающая ПАВ.

### Физико-математическая модель

Общий план аналитического подхода к расчету фильтров на ПАВ на основе МСМ и его формализации на базе  $P$ -матриц изложен в работе [8]. В качестве примера, на котором будем анализировать частотные характеристики, выбрана конструкция двухмодового фильтра на продольных резонансных модах (в англ. литературе — это double mode SAW filters (DMS) [15, 16]), представленная на рис. 1, *a*. В рамках подхода МСМ устройство на ПАВ удобно рассматривать в виде четырехполюсника (рис. 1, *б*), который описывается в системе  $Y$ -параметров. Матрица  $Y$ -параметров описывает поведение любой линейной электрической сети, которую можно рассматривать как "черный ящик" с рядом портов. Порт в этом контексте — это пара электрических выводов, по которым протекают токи и между которыми имеется определенное напряжение.



**Рис. 1. Эквивалентное представление фильтра на ПАВ:**  
а — топология; б — в виде четырехполюсника; в — акустоэлектрическая схема для МСМ

На начальном этапе необходимо составить, исходя из топологии фильтра, эквивалентную акустоэлектрическую схему устройства (рис. 1, *в*), в которой элементарными блоками являются ОС и ВШП. Эквивалентная акустоэлектрическая схема (рис. 1, *в*) звена DMS (см. рис. 1, *а*) включает блоки 1, 5, 9 — ОС; блоки 2, 3, 4, 6, 7, 8 — ВШП. Каждый блок имеет два акустических и один электрический вход;  $a_1 \dots a_{10}$ ,  $b_1 \dots b_{10}$  — амплитуды волн на выходах и входах и акустических блоках соответственно. К входному порту приложен потенциал  $U_1$ , к выходному —  $U_2$ , через них текут токи  $I_1$  и  $I_2$  соответственно. Число электродов и апертуры ВШП и ОС выбирают таким образом, чтобы выполнялись требования по реализации необходимых характеристик фильтра: полосы пропускания, минимальных вносимых потерь, заграждения, неравномерности АЧХ и др. Для уменьшения потерь в фильтре применяется способ изменения периода на ВШП на крайних электродах преобразователей, призывающих друг другу [17].

ВШП в рамках МСМ представляется шестиполюсником с двумя акустическими портами и одним

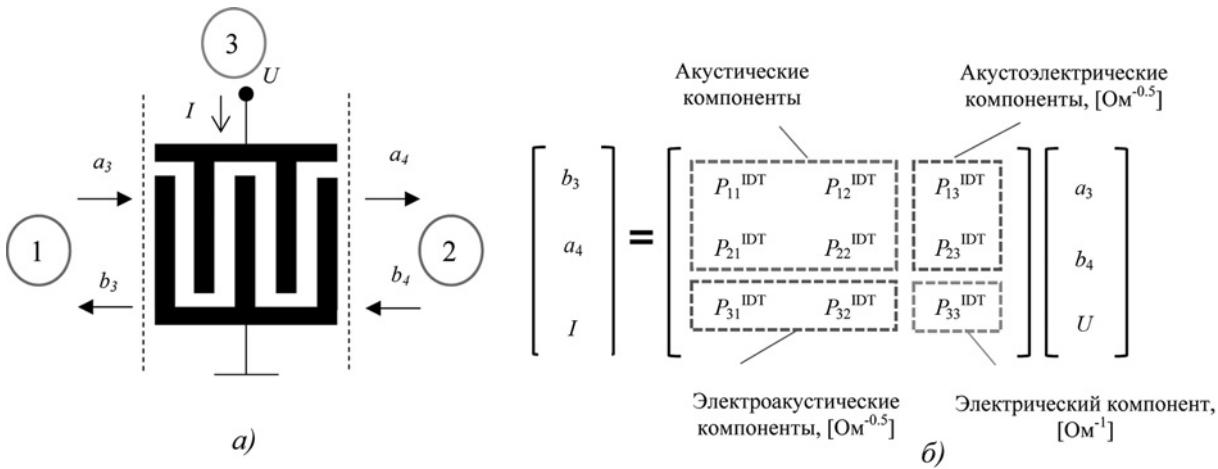


Рис. 2. Модель для расчета:

*a* — представление ВШП для МСМ; *б* — в виде компонент *P*-матриц

электрическим (рис. 2, *a*), который можно описать соответствующей *P*-матрицей (рис. 2, *б*).

Применяя модель *P*-матрицы, топологию фильтра можно представить в виде, показанном на рис. 1, *a*. ВШП-2 и ВШП-5 являются входными преобразователями и подключены к входному порту. Электрические порты по выходу ВШП-1, ВШП-3, ВШП-4, ВШП-6 соединены параллельно. Акустические порты блоков соединены последовательно друг с другом в соответствии с топологическим описанием.

На втором шаге вычисляют *P*-матрицы всех элементарных звеньев, это могут быть один электрод ВШП, одна полоска ОС и зазор (свободная или металлизированная поверхность).

При распространении ПАВ в периодической электродной структуре имеют место процессы отражения и преобразования ПАВ. Присутствие электродов на поверхности меняет скорость распространения волн и обуславливает взаимную связь между волнами, которая вызвана двумя причинами. Во-первых, частичным отражением ПАВ от электродов и, во-вторых, возбуждением ПАВ посредством высокочастотного тока, протекающего в электродах. Акустические компоненты  $P_{11}$ ,  $P_{12}$ ,  $P_{21}$ ,  $P_{22}$  описывают коэффициенты передачи и отражения по акустическим портам 1 и 2 соответственно. Компоненты  $P_{13}$ ,  $P_{23}$  отражают эффективность возбуждения поверхностных акустических волн посредством подачи напряжения  $U$  на шины ВШП. Компоненты  $P_{31}$ ,  $P_{32}$  характеризуют эффективность преобразования ПАВ в электрический ток  $I$  в шинах ВШП.  $P_{13}$ ,  $P_{23}$ ,  $P_{31}$ ,  $P_{32}$  прямо пропорциональны эффективному значению коэффициента электромеханической связи. Элемент  $P_{33}$  суммарной матрицы определяет искомую проводимость ВШП  $Y$ . Для анализа устройства необходимо определить все компоненты *P*-матрицы.

В рассматриваемом подходе ВШП и ОС представляются как череда ячеек, каждая из которых характеризуется коэффициентами отражения и прохожде-

ния. В общем случае рассматриваем симметричные структуры, тогда для ячейки можно определить:

$$P_{11} = r_0 \exp(-jkp), \quad P_{12} = t_0 \exp(-jkp),$$

где  $r_0$  — коэффициент отражения от электрода;  $t_0$  — коэффициент прохождения через электрод;  $p$  — период следования электродов;  $k$  — волновое число,  $k = 2\pi f/V_0 - \gamma$ ;  $V_0$  — фазовая скорость под электродом;  $\gamma$  — коэффициент потерь.

Коэффициент отражения  $r_0$  элементарной ячейки и фазовая скорость  $V_0$  под электродом являются ключевыми параметрами МСМ и могут быть определены численным способом по методике, предложенной в работе [14].

В силу симметрии и взаимности  $P_{11} = P_{22}$ ;  $P_{12} = P_{21}$ , тогда коэффициент прохождения через электрод  $k_{r0}$  определяется как  $t_0 = \sqrt{1 - |r_0|^2}$ .

В симметричных структурах всегда (даже при наличии неизбежных потерь) выполняется соотношение  $\text{Re}(r_0/t_0) = 0$  [11]. По фазовым соотношениям коэффициент отражения и отражения находятся в фазовой квадратуре:

$$\theta_{r0} = \theta_{t0} \pm \pi/2.$$

Исходя из сказанного, для акустических компонент в общем случае в отсутствии источников потерь можно сформировать проверочные условия:

$$|P_{11}|^2 + |P_{12}|^2 = 1;$$

$$|P_{22}|^2 + |P_{21}|^2 = 1;$$

$$P_{11}P_{12}^* + P_{22}^*P_{21} = 1 \quad (* — \text{знак комплексного сопряжения}).$$

Физический смысл акустических компонент хорошо прослеживается на рис. 3, где  $P_{11}$  характеризует коэффициент отражения рассматриваемого блока в целом (ВШП или ОС), а  $P_{21}$  — коэффициент прохождения через ВШП (или ОС). Параметры МСМ, по-

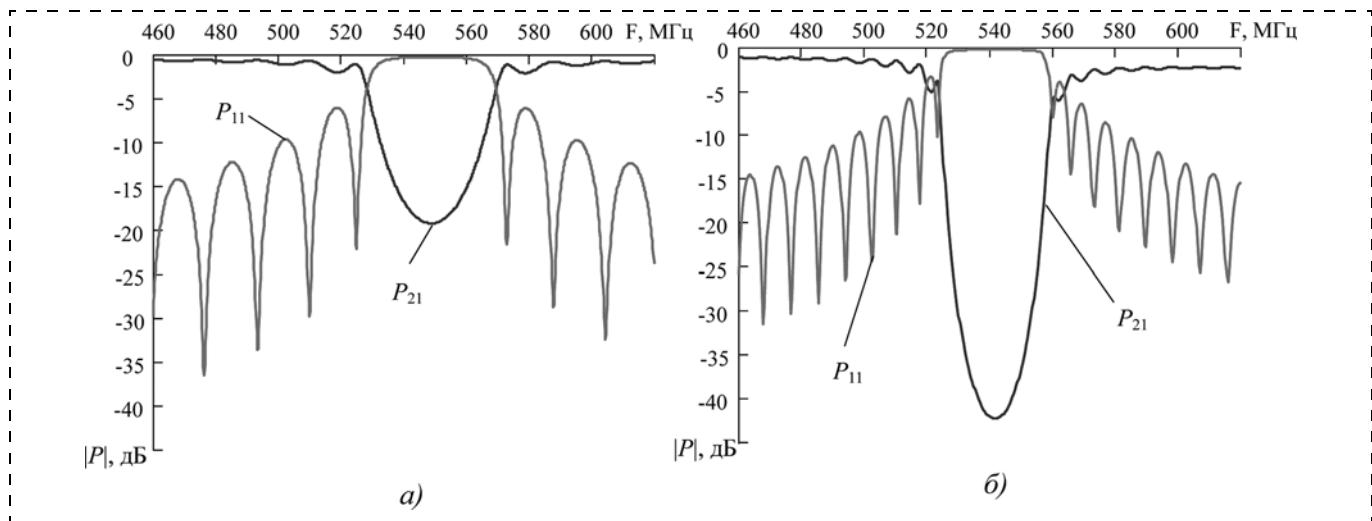


Рис. 3. Акустические компоненты для блоков:

*a* — ВШП; *б* — ОС

лученные с помощью методики [14] и принятые в расчете будут: коэффициент отражения  $r_0 \approx -0,085i$  ( $i$  — мнимая единица), скорость под электродами  $V_0 \approx 4455$  м/с;

$$P_{13} = j\psi \frac{1}{2} \sqrt{Y_0 J_0} \exp(-jkp/2),$$

где  $\psi$  определяет полярность подключения к потенциальной шине или земле  $Y_0 = W(2\pi f)\epsilon_{eff} K_{eff}^2$ ;  $W$  — апертура;  $f$  — частота;  $K_{eff}$  — коэффициент электромеханической связи;  $\epsilon_{eff}$  — диэлектрическая проницаемость материала;  $J_0$  — распределение (плотности) тока на электродах ВШП или нормированная Фурье компонента поверхностной плотности тока:

$$\begin{aligned} J_0 &= \frac{\sin(X)}{X}; \\ X &= ka/2; \\ k &= 2\pi f/V_0 - \gamma; \\ P_{33} &= G_a + jB_a + j(2\pi f)C_0; \\ G_a &= \frac{1}{2} Y_0 \left( \frac{\sin X}{X} \right)^2. \end{aligned}$$

Реактивная составляющая — преобразование Гильберта от активной составляющей

$$B_a = \frac{1}{2} Y_0 \frac{\sin(2X) - 2X}{2X^2};$$

$C_0$  — статическая емкость.

Акустоэлектрические, электроакустические и электрические компоненты  $P$ -матрицы должны подчиняться следующим правилам [10]:

1) выполнение условий взаимности:

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

2) закон сохранения энергии:

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

Графическую визуализацию для данных компонент можно наблюдать на рис. 4. Причем для наглядности на рис. 4, *б*  $\operatorname{Re}(P_{33})$  соответствует расчету без учета резистивных потерь, а случай  $|P_{13}|^2 + |P_{23}|^2$  — с учетом резистивных потерь. Понятно, что при одинаковых условиях данные характеристики тождественны.

В общем случае необходимо определить три независимых компоненты  $P$ -матрицы:  $P_{11}$ ,  $P_{13}$  и  $P_{33}$ .

Полная проводимость преобразователя представлена на рис. 5.

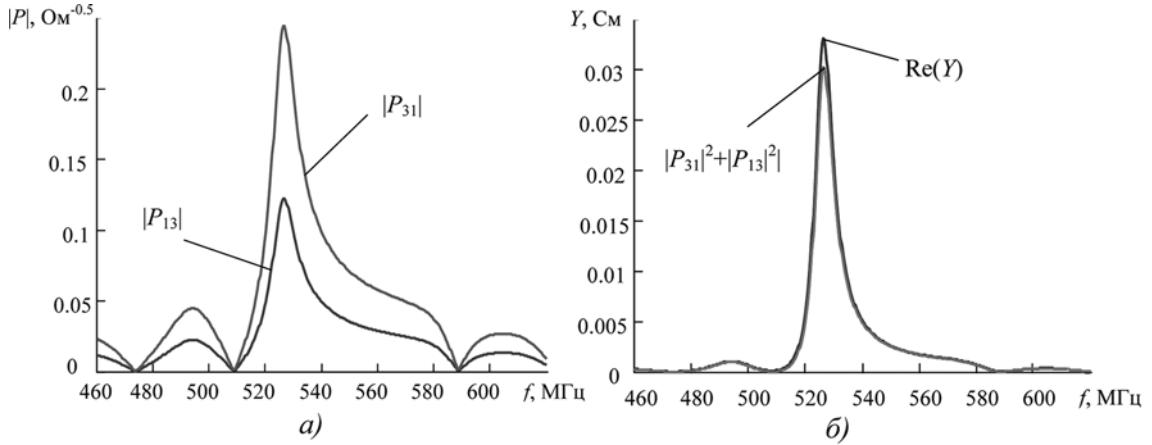
Асимметрия в акустоэлектрических, электроакустических и электрических характеристиках объясняется как раз наличием внутренних переотражений внутри преобразователя.

На следующем шаге необходимо вычислить суммарную матрицу, определяющую связь комплексных амплитуд волн на входе и выходе фильтра, из которой далее сформировать матрицу проводимостей устройства. Причем необходимо вычислить суммарные матрицы в зависимости от условий по электрическим входу и выходу ( $U_1 = 0$ ,  $U_2 = 1$  или  $U_2 = 0$ ,  $U_1 = 1$ ) из следующего соотношения:

$$\begin{bmatrix} b_1 \\ a_{10} \\ I_i \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} P_{11} & P_{12} & P_{13} \\ P_{21} & P_{22} & P_{23} \\ P_{31} & P_{32} & (P_{33})_{ik} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} a_1 \\ b_{10} \\ U_k \end{bmatrix}_{Uj=0; (i, k, j = 1, 2; j \neq k)},$$

где  $a_1 \dots a_{10}$ ,  $b_1 \dots b_{10}$  — амплитуды волн на входах и выходах и акустических блоков,  $I$  и  $U$  — токи и напряжения на входном и выходном электрических портах.

Вычисляя суммарную  $P$ -матрицу фильтра для различных токов и напряжений по входу и выходу можно получить полную матрицу проводимостей, описывающую четырехполюсник. В матричной форме рассматриваемый ПАВ фильтр, как четырехполюсник



**Рис. 4. Компоненты  $P$ -матрицы для ВШП:**  
 $a$  — акустоэлектрические и электроакустические;  $b$  — электрические

(см. рис. 1,  $\delta$ ), можно описать с помощью матрицы проводимостей:

$$\begin{bmatrix} I_1 \\ I_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Y_{11} & Y_{12} \\ Y_{21} & Y_{22} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} U_1 \\ U_2 \end{bmatrix},$$

где  $I_i$  и  $U_i$  ( $i = 1, 2$ ) — токи и напряжения на входных и выходных электрических портах соответственно. Элементы  $Y_{11}$ ,  $Y_{12}$ ,  $Y_{21}$ ,  $Y_{22}$  —  $Y$ -параметры четырехполюсника необходимо определить с помощью МСМ.

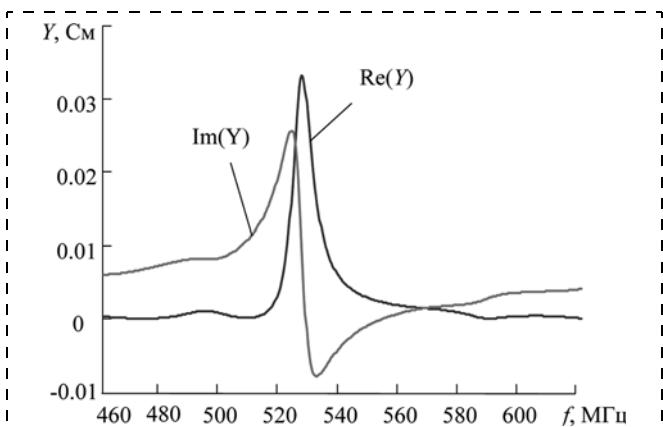
Рассмотрение физического смысла  $Y$ -параметров позволит проанализировать двухпортовое устройство на ПАВ. Рассмотрим случай  $U_1 = 0$ . Тогда

$$Y_{22} = \frac{I_2}{U_2} \Bigg|_{U_1=0}, \quad Y_{12} = \frac{I_1}{U_2} \Bigg|_{U_1=0}.$$

Определяя элемент  $Y_{22}$ , учитываем  $U_1 = 0$ , что соответствует короткому замыканию по входному порту, т.е. возбуждения акустических волн с помощью преобразователя, подключенного ко входу, не происходит. К выходному преобразователю прикладывается напряжение, отличное от нуля,  $U_2 \neq 0$ . Тогда един-

ственная возбужденная волна от выходного преобразователя с некоторой амплитудой распространяется по всей конструкции, претерпевая переотражения, а по шинам выходного ВШП-1, ВШП-3, ВШП-4, ВШП-6 протекает ток  $I_1$ . Обеспечивая данные условия при расчете суммарной  $P$ -матрицы, можно получить элемент  $(P_{33})_{22}$ , который и будет элементом  $Y_{22}$ . В этом случае, несмотря на то, что третьим и седьмым элементами являются входные ВШП, уравнение из матрицы, связывающее ток  $I_1$  и напряжение  $U_1$ , исключается, тем самым элементы матрицы  $P_{13}$ ,  $P_{31}$ ,  $P_{32}$ ,  $P_{33}$  будут нулевыми. Таким образом данные элементы ВШП будут рассматриваться как короткозамкнутые решетки. Приведем пример записи каскадного включения матриц в рассматриваемой топологии фильтра (см. рис. 1,  $a$ ,  $\delta$ ):

$$\begin{aligned} [P]_\Sigma &= \begin{bmatrix} P_{11} & P_{12} & 0 \\ P_{21} & P_{22} & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}_{OC1} \times \begin{bmatrix} P_{11} & P_{12} & P_{13} \\ P_{21} & P_{22} & P_{23} \\ P_{31} & P_{32} & P_{33} \end{bmatrix}_{VSP1} \times \\ &\times \begin{bmatrix} P_{11} & P_{12} & 0 \\ P_{21} & P_{22} & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}_{VSP2} \times \begin{bmatrix} P_{11} & P_{12} & P_{13} \\ P_{21} & P_{22} & P_{23} \\ P_{31} & P_{32} & P_{33} \end{bmatrix}_{VSP3} \times \\ &\times \begin{bmatrix} P_{11} & P_{12} & 0 \\ P_{21} & P_{22} & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}_{OC2} \times \begin{bmatrix} P_{11} & P_{12} & P_{13} \\ P_{21} & P_{22} & P_{23} \\ P_{31} & P_{32} & P_{33} \end{bmatrix}_{VSP4} \times \\ &\times \begin{bmatrix} P_{11} & P_{12} & 0 \\ P_{21} & P_{22} & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}_{VSP5} \times \begin{bmatrix} P_{11} & P_{12} & P_{13} \\ P_{21} & P_{22} & P_{23} \\ P_{31} & P_{32} & P_{33} \end{bmatrix}_{VSP6} \times \\ &\times \begin{bmatrix} P_{11} & P_{12} & 0 \\ P_{21} & P_{22} & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}_{OC3}. \end{aligned}$$



**Рис. 5. Электрическая составляющая  $P$ -матрицы ( $P_{33}$ ) для ВШП**

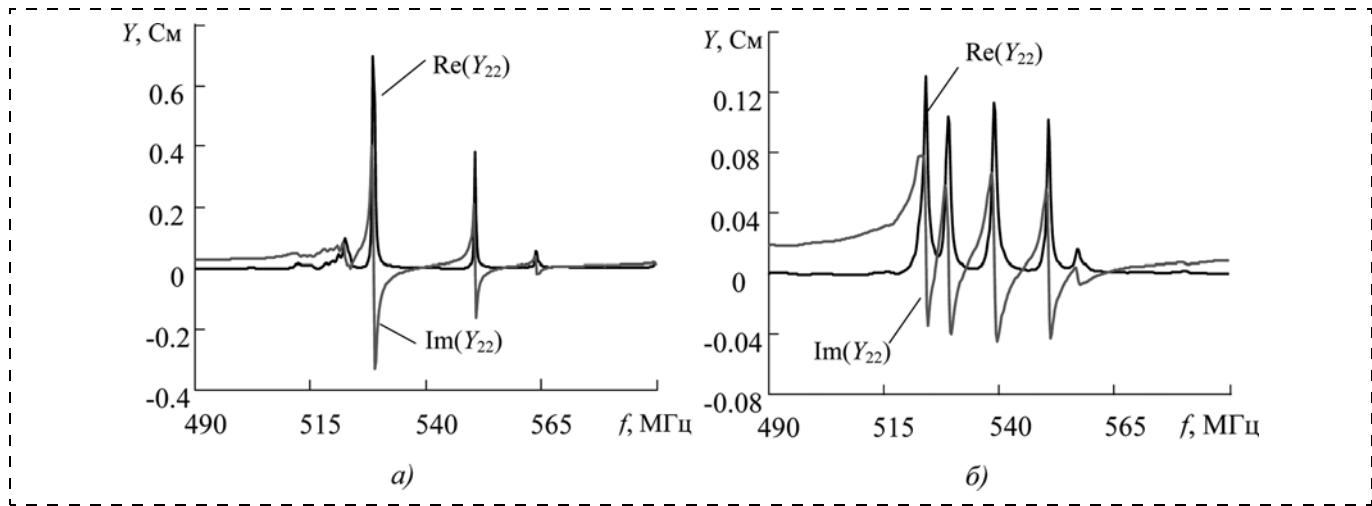


Рис. 6. Расчетная проводимость  $Y_{22}$ :

*а* — одной секции; *б* — каскадного включения двух секций фильтра

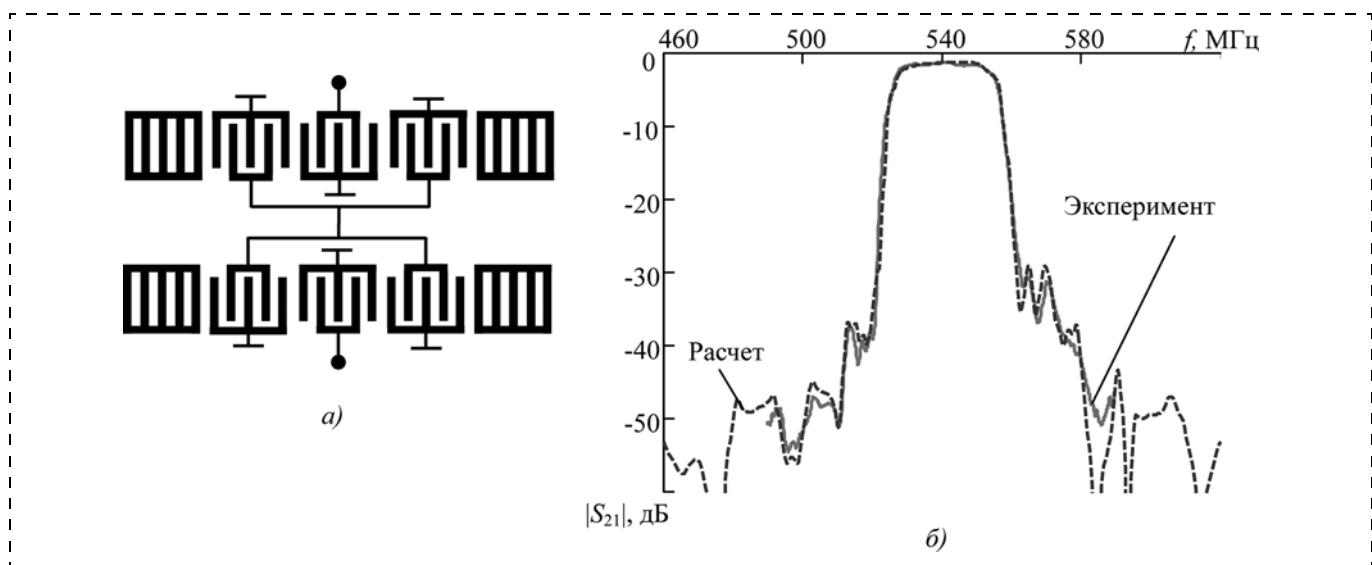


Рис. 7. Фильтр DMS:

*а* — пример каскадного включения звеньев фильтра (1 секция для примера — 5 блоков); *б* — сравнение расчетной и экспериментальной АЧХ двухкаскадного фильтра (1 секция в образце — 9 блоков)

$Y_{12}$  — передаточная проводимость из выходного порта во входной при коротком замыкании на входе. Для тех же условий по входу и выходу  $U_2 \neq 0$  и  $U_1 = 0$  возбужденная акустическая волна, распространяющаяся в сторону входного преобразователя, за счет прямого пьезоэлектрического эффекта приводит к возникновению тока  $I_1$ . Обеспечивая данные условия при расчете суммарной  $P$ -матрицы, можно получить элемент  $(P_{33}^{\Sigma})_{12}$ , который и будет элементом  $Y_{12}$ . Аналогичные рассуждения можно применить и для  $Y_{11}$  и  $Y_{21}$ . Для пассивного четырехполюсника передаточные проводимости  $Y_{12} = Y_{21}$ , таким образом, в матрице  $Y$ -параметров — три независимых параметра.

Примеры расчетных характеристики  $Y_{22}$  фильтра DMS представлены на рис. 6.

В данном подходе не нужно сводить большой набор матриц к минимальному числу, требуемому для определения токов на входе и выходе. Нет необходимости рассматривать сложные эквивалентные схемы, поскольку при числе входных и выходных ВШП больше двух возникает большое число неких перекрестных параметров, для которых затруднительно определить физический смысл. Необходимо лишь контролировать состояние портов (первое условие:  $U_1 = 1$ ,  $U_2 = 0$ ; второе условие:  $U_1 = 0$ ,  $U_2 = 1$ ) и определить только три неизвестных параметра, которые имеют определенный физический смысл и понятны для расчета.

Таким образом, для успешной реализации МСМ с применением  $P$ -матриц необходимо знать: 1) правила

каскадирования  $P$ -матриц [9]; 2) переход от набора  $Y$ -параметров к  $S$ -параметрам [9]; 3) способ определения  $COM$ -параметров [14, 18].

Пример каскадного включения звеньев фильтра представлен на рис. 7, а. Сравнение расчетной и экспериментальной АЧХ двухкаскадного фильтра (1 секция — 9 блоков) представлено на рис. 7, б.

## Заключение

Представлены современное состояние аналитического подхода к расчету фильтров на ПАВ на основе модели связанных мод и формализация данного подхода на базе  $P$ -матриц. Теоретически рассчитаны и представлены основные характеристики  $P$ -матриц на примере полосового резонаторного фильтра на вытекающих ПАВ на  $64^\circ$  УХ-срезе ниобата лития. Выполненное сравнение результатов расчета и экспериментальных характеристик коэффициента передачи для полосового резонаторного фильтра на основе двухмодового фильтра (DMS) показало хорошее совпадение. Использованная модель связанных мод на основе модифицированных уравнений для связанных мод и матричный подход к формализации вычислений предоставляют разработчику эффективный и легко адаптируемый к изменениям топологии инструмент для предварительного расчета характеристик акустоэлектронных устройств.

Описанный подход по аналогии может быть использован при анализе устройств, имеющих более сложную топологическую структуру ВШП и ОС, на подложках из любых материалов, а также устройств (как резонаторных, так и трансверсальных) на акустических волнах других типов.

*Автор выражает благодарность Рейтуму В. Р. — Генеральному директору — генеральному конструктору ООО "АЭК Дизайн" за предоставление экспериментальных данных.*

## Список литературы

- Багдасарян А., Синицына Т., Машинин О., Иванов П., Егоров Р. Устройства частотной селекции на ПАВ в современных системах связи, радиолокации и телекоммуникации // Электроника: наука, технология, бизнес. 2013. № 8. С. 128–136.
- Койгеров А. С. Достижение критических и предельных параметров в микроприборах на поверхностных акустических

волнах // Нано- и микросистемная техника. 2022. Т. 24, № 4. С. 199–207.

3. Сучков С. Г., Никитов С. А., Янкин С. С. и др. К вопросу об антискользящей защите пространственно удаленных радиочастотных идентификационных меток на поверхностных акустических волнах // Радиотехника и электроника. 2016. Т. 61, № 8. С. 806–810.

4. Анцев И. Г., Богословский С. В., Сапожников Г. А., Жгун С. А., Швецов А. С. Датчик температуры на поверхностных акустических волнах // Датчики и системы. 2018. № 1 (22). С. 40–48.

5. Койгеров А. С. Мультифизическое моделирование двухмодового фильтра на ПАВ // Техника радиосвязи. 2022. № 2 (53). С. 118–127.

6. Шевченко С. Ю., Михайленко Д. А., Ньямверу Б. Оптимизация конструкции встречно-штыревого преобразователя кольцевого резонатора на поверхностных акустических волнах // Изв. вузов России. Радиоэлектроника. 2021. Т. 24, № 6. С. 51–62.

7. Орлов В. С. Широкополосный двухмодовый фильтр на ПАВ с неэквидистантными электродами преобразователей и отражательных решеток // Т-Софт: Телекоммуникации и транспорт. 2019. Т. 13, № 6. С. 36–45.

8. Дмитриев В. Ф. Вывод модифицированных уравнений связанных поверхностных акустических волн // Радиотехника и электроника. 2009. Т. 54, № 9. С. 1134–1143.

9. Койгеров А. С. Аналитический подход к расчету резонаторного комбинированного фильтра на поверхностных акустических волнах на основе модели связанных мод // Изв. вузов России. Радиоэлектроника. 2022. Т. 25, № 2. С. 16–28. DOI: 10.32603/1993-8985-2022-25-2-16-28.

10. Plessky V., Koskela J. Coupling-of-modes analysis of SAW devices. Int. J. High Speed Electron. Syst. 2000. Vol. 10. P. 867–947.

11. Sveshnikov B. Discrete analysis of regular systems // Proc. IEEE International Ultrasonics Symposium. 2010. P. 1890–1893. DOI: <https://doi.org/10.1109/ULTSYM.2010.5935881>

12. Rukhlenko A. S. Nodal Analysis of Multitransducer SAW Devices // IEEE Ultrason. Symp., Seattle, USA, 7–10 Nov. 1995. P. 297–300. DOI: 10.1109/ULTSYM.1995.495586

13. Карпев Д. В., Киселев С. В., Кондратьев С. Н., Орлов В. С. Эффекты "второго порядка" в устройствах на поверхностных акустических волнах // Зарубежная радиоэлектроника. 1986. № 5. С. 46–59.

14. Койгеров А. С., Балышева О. Л. Быстрый численный расчет параметров поверхностных акустических волн Рэля для модели связанных мод // Изв. вузов России. Радиоэлектроника. 2022. Т. 25, № 5. С. 67–79.

15. Morita T., Watanabe Y., Tanaka M., Nakazawa Y. Wideband Low Loss Double Mode SAW Filters // IEEE Ultrasonics Symposium Proceedings. 1992. P. 95–104.

16. Доберштайн С. А. Балансные узкополосные двухмодовые фильтры на ПАВ с малыми потерями и улучшенной избирательностью // Техника радиосвязи. 2019. № 4 (43). С. 79–85.

17. Макаров В. М., Иванов П. Г., Данилов А. Л., Зая В. Г. Резонаторные фильтры на поверхностных акустических волнах на основе дисперсионных преобразователей // Радиотехника и электроника. 2008. Т. 53, № 3. С. 377–382.

18. Чередник В. И., Двоешерстов М. Ю. Распространение поверхностных акустических волн в пьезоэлектрической среде при наличии периодической структуры типа "канавка" // Акустический журнал. 2010. Т. 56, № 1. С. 41–50.

**A. S. Koigerov, Ph. D., Tech., Associate Professor at the Department of micro- and nano electronics,**  
a.koigerov@gmail.com,

Saint Petersburg Electrotechnical University "LETI", 197376, St. Petersburg, Russian Federation.

*Corresponding author:*

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

# Theoretical Features of the Application of Modified Coupling of Modes Model and its Formalization based on *P*-matrices for Calculating the Frequency Responses of SAW filters

Received on April 07, 2023

Accepted on May 15, 2023

Surface acoustic wave (SAW) filters are widely used in various applications, including wireless communication systems and radar systems, due to their advantages such as small size, low cost, high reliability and excellent performance in terms of insertion loss and out-of-band suppression. The most important stage in the development of SAW filters is mathematical modeling. Reducing the design time while reducing the cost of developing filters is an urgent task that can be solved both through the use of modern computing soft and by improving and developing already known modeling tools. The purpose: theoretical analysis and experimental verification of the possibility of implementing the proposed method for calculating SAW devices based on modified equations for coupling of modes (COM) model. Results: the current state of the analytical approach to calculating SAW filters based on the modified COM model and the formalization of this approach based on *P*-matrices are shown. The main responses of *P*-matrices are theoretically calculated and presented using the example of a resonator filter on leaky SAW at 64°YX-cut lithium niobate. The filter has a relative bandwidth of 5 %, insertion loss of -1.2 dB and rejection of -40 dB. The results of the calculated and experimental frequency responses of the filter are compared. The proposed analytical approach to designing SAW bandpass filters allows you to quickly and relatively accurately predict frequency responses at the modeling stage, thereby reducing the number of experimental iterations and increasing the efficiency of development.

**Keywords:** surface acoustic waves, SAW filter, coupling of modes model, COM method, piezoelectric substrate, strong piezoelectric material, lithium niobate

For citation:

**Koigerov A. S.** Theoretical features of the application of modified coupling of modes model and its formalization based on *P*-matrices for calculating the frequency responses of SAW filters, *Nano- i mikrosistemnaya tekhnika*, 2023, vol. 25, no. 4, pp. 181–188.

DOI: 10.17587/nmst.20.181-188

## References

1. Bagdasaryan A., Sinitzina T., Mashinin O., Ivanov P., Egorov R. SAW frequency selection devices for modern communication and telecommunication systems, *Electronics: Science, technology, business*. 2013, no. 8, pp. 128–136 (in Russian).
2. Koigerov A. S. Achievement of Critical and Limiting Parameters in Surface Acoustic Wave Microdevices, *Nano- i mikrosistemnaya tekhnika*, 2022, vol. 24, no. 4, pp. 199–207 (in Russian).
3. Suchkov S. G., Nikitov S. A., Yankin S. S. et al. Anticollision protection of distant radio-frequency identification tags based on surface acoustic waves, *Journal of Communications Technology and Electronics*, 2016, vol. 61, pp. 932–936.
4. Ancev I. G., Bogoslovsky S. V., Sapognikov G. A., Zhgoon S. A., Shvetsov A. S. Surface acoustic wave temperature sensor, *Sensors and Systems*, 2018, no. 1 (221), pp. 40–48 (in Russian).
5. Koigerov A. S. Multiphysics simulation of double-mode SAW filter, *Radio communication technology*, 2022, is. 2 (53), pp. 118–127 (in Russian).
6. Shevchenko S. Yu., Mikhailenko D. A., Nyamweru B. Optimizing the Design of Surface-Acoustic-Wave Ring Resonator by Changing the Interdigitated Transducer Topology, *Journal of the Russian Universities. Radioelectronics*, 2021, vol. 24, no. 6, pp. 51–62 (in Russian).
7. Orlov V. S. Wideband Two-Mode Leaky Surface Acoustic Wave Filter with Non-Equidistant Electrodes of Transducers and Reflecting Gratings. *T-Comm.* 2019, vol. 13, no. 6, pp. 36–45 (in Russian).
8. Dmitriev V. F. Modified equations of coupled surface acoustic waves, *Journal of Communications Technology and Electronics*, 2009, vol. 54, no. 9, pp. 1077–1086.
9. Koigerov A. S. Analytical Approach to Designing a Combined-Mode Resonator Filter on Surface Acoustic Waves Using the Model of Coupling of Modes, *Journal of the Russian Universities. Radioelectronics*, 2022, vol. 25, no. 2, pp. 16–28 (in Russian).
10. Plessky V., Koskela J. Coupling-of-modes analysis of SAW devices, *Int. J. High Speed Electron. Syst.*, 2000, vol. 10, pp. 867–947.
11. Sveshnikov B. Discrete analysis of regular systems // *IEEE International Ultrasonics Symposium*, 2010, pp. 1890–1893. DOI: <https://doi.org/10.1109/ULTSYM.2010.5935881>.
12. Rukhlenko A. S. Nodal Analysis of Multitransducer SAW Devices, *IEEE Ultrason. Symp.*, Seattle, USA, 7–10 Nov. 1995, pp. 297–300. DOI: [10.1109/ULTSYM.1995.495586](https://doi.org/10.1109/ULTSYM.1995.495586).
13. Karpeyev D. V., Kiselev S. V., Kondrat'yev S. N., Orlov V. S. Effekty "vtorogo poryadka" v ustroystvakh na poverkhnostnykh akusticheskikh volnakh, *Zarubezhnaya radioelektronika*, 1986, no. 5, pp. 46–59 (in Russian).
14. Koigerov A. S., Balyshewa O. L. Rapid Numerical Calculation of Rayleigh Surface Acoustic Wave Parameters for a Model of Coupling Modes, *Journal of the Russian Universities. Radioelectronics*, 2022, vol. 25, no. 5, pp. 67–79 (in Russian).
15. Morita T., Watanabe Y., Tanaka M., Nakazawa Y. Wideband Low Loss Double Mode SAW Filters, *IEEE Ultrasonics Symposium Proceedings*, 1992, pp. 95–104.
16. Doberstein S. A. Balanced low-loss narrowband double mode SAW filters with improved selectivity, *Radio communication technology*, 2019, iss. 4 (43), pp. 79–85 (in Russian).
17. Makarov V. M., Ivanov P. G., Danilov A. L., Zaya V. G. Surface acoustic wave resonator filters based on dispersive transducers, *Journal of Communications Technology and Electronics*, 2008, vol. 53, no. 3, pp. 355–359.
18. Cherednik V. I., Dvoesherstov M. Yu. Propagation of surface acoustic waves in a piezoelectric medium with a periodic groove structure, *Acoustical Physics*, 2010, vol. 56, no. 1, pp. 37–46 (in Russian).

# ЭЛЕМЕНТЫ МНСТ MICRO- AND NANOSYSTEM TECHNIQUE ELEMENTS

УДК 621.389

DOI: 10.17587/nmst.25.189-194

Д. С. Адамович, мл. науч. сотр., В. М. Айвазян, мл. науч. сотр.,

И. К. Хмельницкий, канд. хим. наук, вед. науч. сотр., khmelnitskiy@gmail.com,

**[В. В. Лучинин]**, д-р техн. наук, гл. науч. сотр., С. Е. Парфенович, инженер,

Ю. Д. Орехов, инженер, А. М. Карелин, инженер, Е. Е. Холодкова, студент

Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет "ЛЭТИ"  
им. В. И. Ульянова (Ленина), Санкт-Петербург, Россия

## УПРАВЛЕНИЕ МАНИПУЛЯТОРОМ С ПОМОЩЬЮ СЕНСОРНОЙ ПЕРЧАТКИ НА ОСНОВЕ ИОННЫХ ЭЛЕКТРОАКТИВНЫХ ПОЛИМЕРОВ

Поступила в редакцию 30.03.2023

Разработана сенсорная перчатка для управления манипулятором в форме кисти руки человека, которая может дистанционно повторять движения пальцев оператора, а также захватывать и удерживать предметы разных размеров и формы. В качестве сенсоров, обеспечивающих работу системы, использовали ионные электроактивные полимеры с гибридными электродами. Такие структуры имеют большую долговечность и характеризуются стабильным изменением сопротивления при изгибе.

**Ключевые слова:** электроактивные полимеры, сенсорная перчатка, манипулятор, передатчик, приемник, дистанционное управление, сервоприводы, контроллер

### Введение

Жизненно важно и необходимо создавать системы или устройства, заменяющие людей при необходимости выполнения технологических операций в условиях воздействия агрессивных сред; для снижения риска внесения загрязнений в чистые помещения и при выполнении медицинских процедур; для обеспечения безопасности при выполнении работ, связанных с взрывчатыми и токсичными веществами, а также для повышения уровня адаптации к окружающей среде людей с ограниченными возможностями [1]. Для решения таких задач создана представленная в работе система, которая состоит из напечатанного на 3D-принтере манипулятора в форме кисти руки человека и сенсорной перчатки, которая управляет его движениями.

Регистрация изгиба пальцев руки оператора осуществлялась за счет интегрированных в перчатку пяти сенсоров, в качестве которых использованы имеющие сегодня значительный потенциал в робототехнике сенсоры на основе ионных электроактивных полимеров (ЭАП) [2]. Среди ионных ЭАП чаще всего используют ионные полимер-металлические компо-

зиты (ИПМК), состоящие из полимерной ионообменной мембранны, на обе стороны которой нанесены металлические электроды [3–6]. При частых и долгих изгиbach в таких структурах, а именно в металлических электродах, появляются трещины. Это вызывает ряд факторов, которые приводят к ухудшению характеристик механоэлектрического преобразования. К таким факторам можно отнести: увеличение сопротивления, утечку электролита и неравномерное распределение электрического поля [7–9].

Большой долговечностью и гибкостью отличаются ионные полимер-полимерные композиты (ИППК). В них вместо металлических электродов используются электроды из органических проводящих полимеров [10–12]. Основной недостаток таких структур заключается в трудности изготовления контактного электрода, связанной с его низкой адгезией к полимерной основе.

Применение ионных полимер-полимер-металлических композитов (ИППМК), в которых используются гибридные электроды, полученные путем добавления к полимерным электродам наночастиц металла, обеспечивает увеличение срока службы сенсора и высокую проводимость [9].

## Возникновение и преобразование электрического сигнала ЭАП-сенсора

Для изготовления сенсора использовали ионообменную мембрану МФ-4СК толщиной 290 мкм, на поверхность которой сначала наносили PEDOT-электроды *in situ* полимеризацией 3,4-этилендиоксигофена, а затем — Pt-электроды химическим восстановлением из раствора  $\text{Pt}(\text{NH}_3)_4\text{Cl}_2$  [9]. В разрабатываемой системе сенсор применяли в качестве элемента, который при изгибе генерировал сигналы, необходимые для преобразования в сигналы управления манипулятором. В качестве сигнала можно использовать генерируемое напряжение, ток или изменение сопротивления. В последнем варианте сенсор на основе ионного ЭАП с точки зрения теории электрических цепей представляет собой переменный резистор [3]. Увеличение угла изгиба приводит к увеличению сопротивления сенсора. На рис. 1 показан ЭАП-сенсор с прикрепленными к нему контактами, необходимыми для считывания и преобразования сигналов при его изгибе.

Для считывания данных с сенсора был разработан и изготовлен делитель напряжения на основе микроконтроллера Arduino Nano. Электрическая схема делителя представлена на рис. 2.

Выходное напряжение делителя определяем по следующей формуле:

$$V_{\text{out}} = V_{\text{in}} \frac{R_2}{R_1 + R_2}, \quad (1)$$

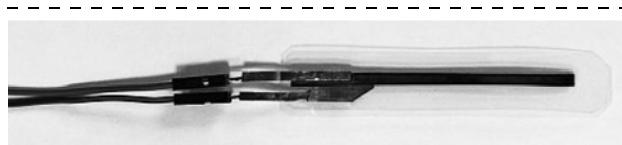


Рис. 1. ЭАП-сенсор

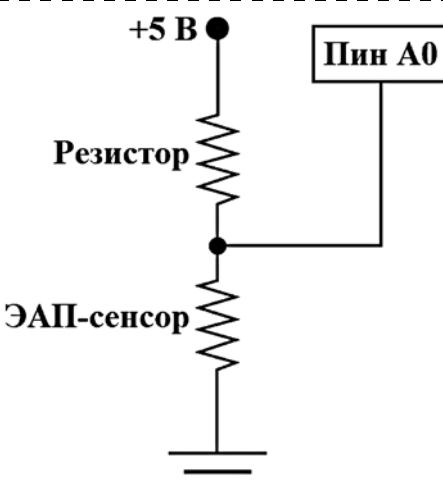


Рис. 2. Делитель напряжения для считывания данных с сенсора

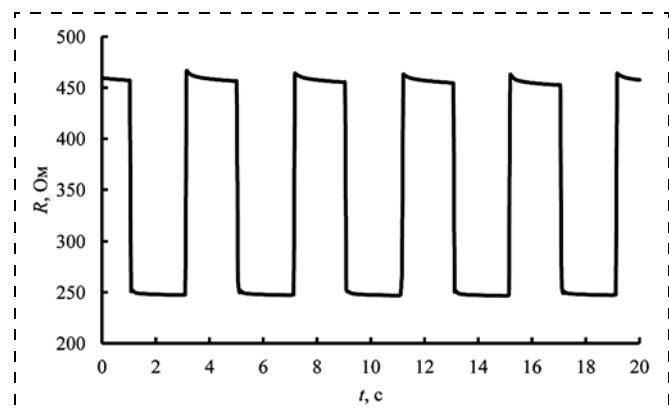


Рис. 3. Временная зависимость сопротивления сенсора при максимальном отклонении 20 мм

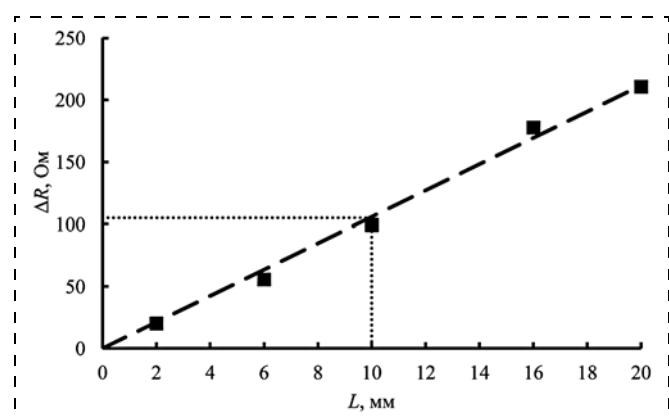


Рис. 4. Изменение разности значений сопротивлений в зависимости от отклонения сенсора

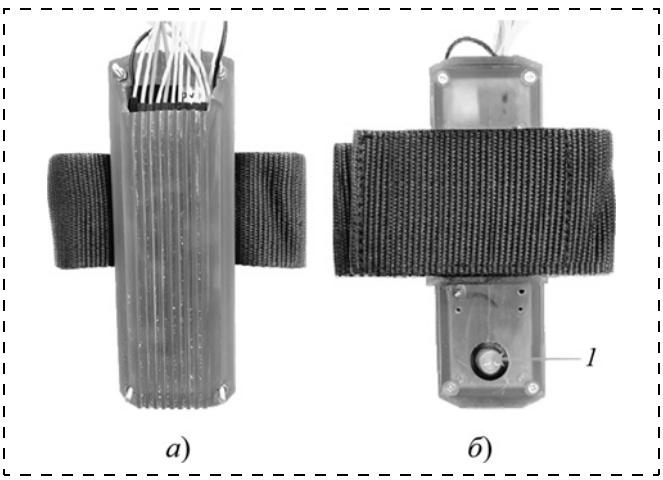
где  $R_2$  — сопротивление сенсора;  $R_1$  — статическое сопротивление резистора;  $V_{\text{in}}$  — входное напряжение;  $V_{\text{out}}$  — напряжение, поступающее на аналоговые пины микроконтроллера Arduino Nano [13].

При этом сопротивление  $R_1$  было подобрано с учетом обеспечения значения напряжения, необходимого для работы микроконтроллера.

## Сопротивление ЭАП-сенсоров при циклическом изменении механического воздействия

На рис. 3 представлена временная зависимость сопротивления сенсора с гибридными электродами при максимальном отклонении 20 мм, которое обеспечивал сервопривод. Один цикл соответствовал времени 2 с. На графике прослеживается стабильное циклическое изменение сопротивления сенсора.

Изменению максимального отклонения в диапазоне 2...20 мм соответствовало линейное изменение разности значений сопротивлений в диапазоне 20...210 Ом (рис. 4). В исследуемом диапазоне отклонений сенсор характеризуется примерно линейным характером зависимости. Графическим методом был определен коэффициент чувствительности сенсора, который составил 10,5 Ом/мм.



**Рис. 5. Модуль передачи данных, который выполнен в форме браслета и обеспечивает работу перчатки:**

*а* — передняя сторона; *б* — обратная сторона; 1 — кнопка включения/выключения

Исследования надежности сенсоров показали, что через два месяца работы сенсоров увеличение сопротивления было незначительно, что связано с наличием слоя проводящего полимера, который улучшает барьерный эффект, уменьшая потери электролита из ионообменной мембрany.

#### Разработка сенсорной перчатки

Основная идея работы заключалась в том, чтобы создать сенсорную перчатку, которая могла бы управлять пальцами манипулятора по беспроводной связи.

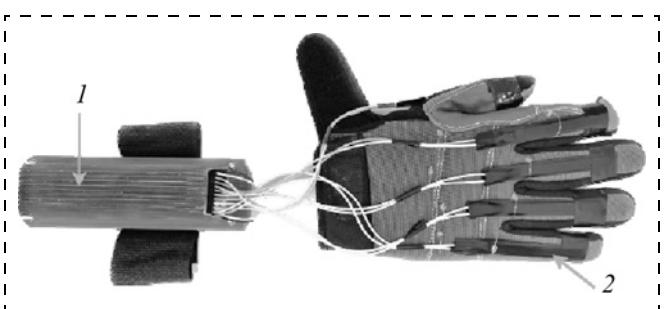
В качестве контроллера, определяющего перемещение манипулятора, была использована человеческая кисть, перемещение пальцев которой отслеживалось с помощью надетой на нее сенсорной перчатки. Для изготовления манипулятора, по внешнему виду и функционалу соответствующего пальцам человеческой кисти, были использованы модели из библиотеки с открытым исходным кодом [14]. Таким образом, система состояла из двух частей: перчатки и манипулятора.

Программирование осуществлялось на языке C в программном обеспечении Arduino IDE. Для системы были разработаны два отдельных набора кодов. Один набор кодов использовался как передатчик, а другой — как приемник. Код, относящийся к передатчику, считывал все значения с сенсоров, создавал вектор, содержащий все данные, и отправлял его на приемник. Как только приемник получал данные, он преобразовывал числа в углы от 0 до 180° и приводил в действие сервоприводы.

Перчатка-контроллер состояла из тканевой основы и ЭАП-сенсоров, закрепленных на каждом пальце перчатки, а также модуля передачи данных в форме браслета, который надевали на запястье оператора (рис. 5). Модуль передачи данных был выполнен для удобства и безопасного ношения перчатки пользователем и состоял из главного контроллера, модуля пе-

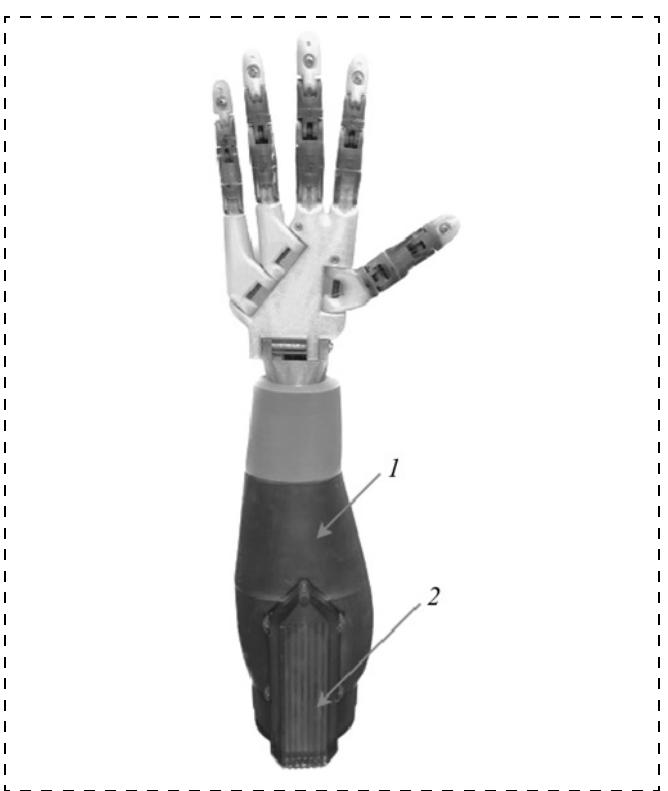
редатчика радиосигнала, источников питания и светодиода. Все электронные компоненты были размещены на минимально возможной площади макетной платы. Для предотвращения внешних механических воздействий каждый сенсор был защищен изолирующим материалом из поливинилхлорида. На рис. 6 представлен внешний вид сенсорной перчатки.

Во время работы в процессе сгибания-разгибания пальцев изменялись значения сопротивления сенсоров, которые преобразовывались в значения напряжения в соответствии с (1). Главный контроллер (Arduino Nano) с модулем передатчика (NRF24L01) обрабатывал полученные входные данные, отображая значения из диапазона напряжений на диапазон углов, и передавал их по Wi-Fi-каналу манипулятору.



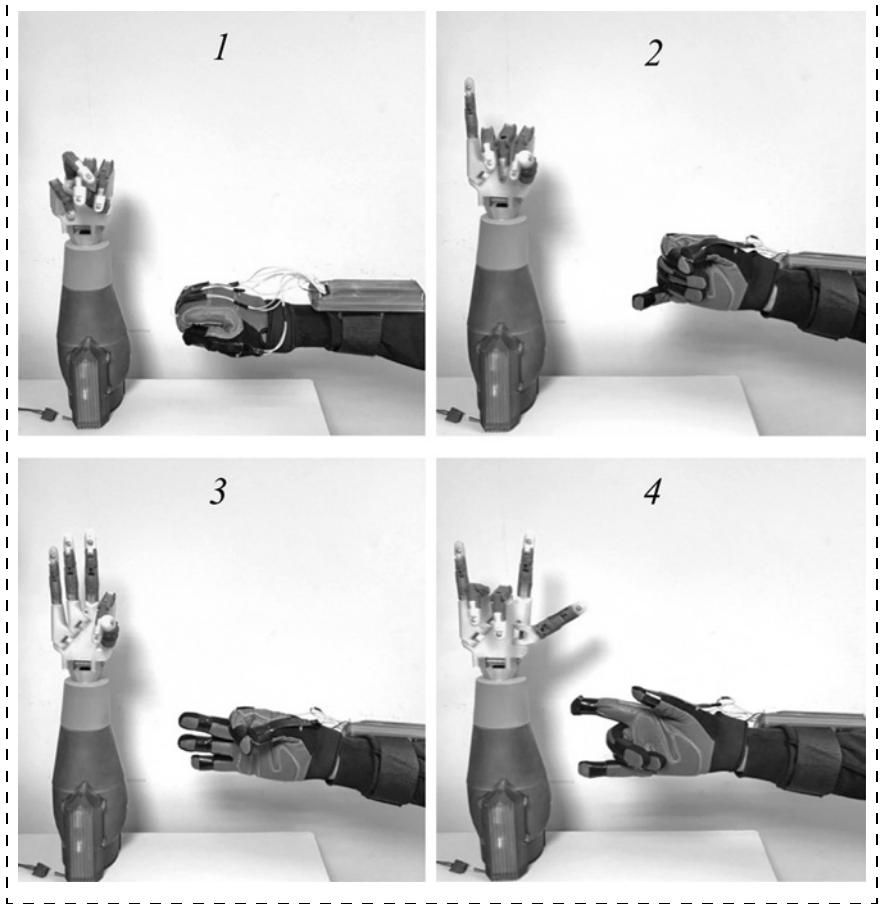
**Рис. 6. Внешний вид сенсорной перчатки:**

*1* — модуль передачи данных (браслет); *2* — ЭАП-сенсор, который закреплен на каждом пальце перчатки



**Рис. 7. Внешний вид манипулятора:**

*1* — предплечье, где установлены сервоприводы; *2* — модуль приема и обработки сигнала



**Рис. 8. Пример соответствия положения пальцев сенсорной перчатки и манипулятора:**

1 — сгибание пяти пальцев; 2 — сгибание четырех пальцев; 3 — сгибание двух пальцев (большого и указательного); 4 — сгибание двух пальцев (среднего и безымянного)

Вследствие возможности возникновения температурных колебаний и нестабильности полимерных материалов во времени сопротивление сенсоров может изменяться даже в отсутствие изгибов. В связи с этим для получения диапазона напряжений необходимо было проводить предварительную настройку системы. Для этого перед началом работы оператор надевал перчатку и браслет, фиксировал пальцы в положение минимальных отклонений и включал перчатку-контроллер с помощью нажатия кнопки на обратной стороне браслета. По световому сигналу оператор перемещал пальцы в положение максимального отклонения (сжимал в кулак), а затем, после того как световой сигнал переставал гореть, возвращал пальцы в исходное положение. После этого можно было приступить к работе.

#### Разработка манипулятора

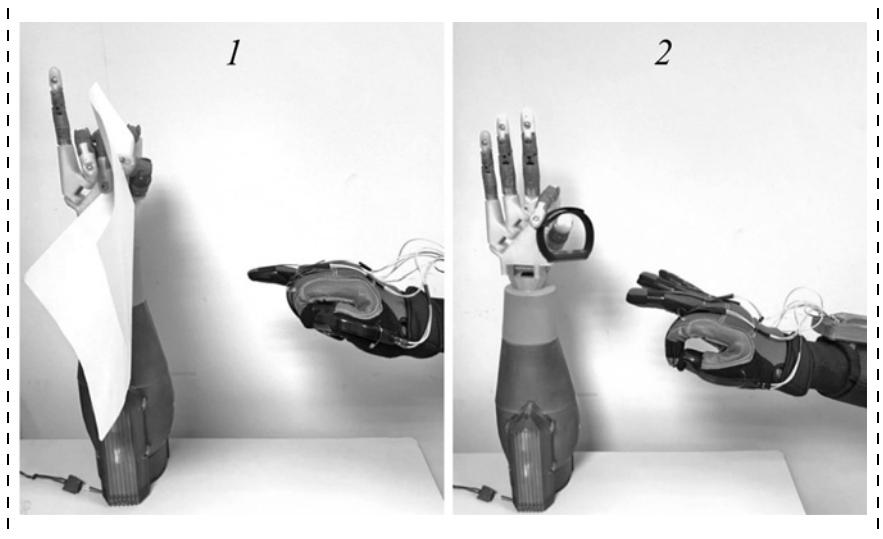
Манипулятор был выполнен в виде соединенных между собой модуля приема и обработки сигнала, передаваемого по Wi-Fi-каналу, и части руки, которую можно условно разделить на предплечье, ладонь и пальцы. Модуль приема и обработки сигнала содержал приемник радиосигнала, подчиненный контроллер и источники питания.

Предплечье, ладонь и пальцы были изготовлены методом печати фотополимерной смолой на 3D-принтере Anycubic Photon. Каждый палец состоял из трех подвижных частей.

Предплечье состояло из основного корпуса, внутри него были установлены сервоприводы, которые передавали возвратно-поступательное движение пальцам с помощью полимерной нити, пропущенной через шкив. На рис. 7 представлен внешний вид манипулятора.

#### Проверка работоспособности системы

Проверку работоспособности системы проводили путем визуального контроля соответствия положения пальцев контроллера и манипулятора.



**Рис. 9. Пример удержания манипулятором предметов:**

1 — лист бумаги; 2 — силиконовый браслет

## Основные характеристики разработанной системы

Параметр	Значение
Коэффициент чувствительности сенсора	10,5 Ом/мм
Управление манипулятором	Дистанционно по Wi-Fi каналу
Дальность передачи данных	100 м в прямой видимости и 30 м в помещении
Задержка выполнения команды	0,1 с
Масса удерживаемого предмета	220 г
Размеры сенсора (длина × ширина × толщина)	55,0 × 10,0 × 0,3 мм
Масса сенсора	0,2 г
Материал, защищающий сенсор	Поливинилхлорид
Число сенсоров	5

После включения и калибровки системы изменение положения пальцев контроллера приводило к передаче сигнала на подчиненный контроллер манипулятора, который управлял сервоприводами.

Были опробованы различные комбинации положения пальцев. Примеры, иллюстрирующие сгибание двух, четырех и пяти пальцев, приведены на рис. 8. В процессе выполнения проверки была подтверждена работоспособность системы как при сгибании каждого из пальцев по отдельности, так и при их различных сочетаниях.

Манипулятор, имитирующий кисть руки человека, мог обеспечивать выполнение стандартных захватов, которые определяли возможности и сферы его применения. В связи с тем, что механическая конструкция руки представляла собой упрощенную модель руки человека, это приводило к невозможности выполнения движений, соответствующих приведению или отведению. Манипулятор был способен захватывать предметы разных размеров и формы. На рис. 9 представлен пример удержания манипулятором листа бумаги четырьмя пальцами и браслета двумя пальцами. Было установлено, что способность удержания предметов ограничена их массой и коэффициентом трения, возникающего между поверхностями пальцев и удерживаемых предметов.

Основные характеристики разработанной системы приведены в таблице.

## Заключение

В работе представлены манипулятор, имитирующий кисть человеческой руки, и сенсорная перчатка, которая выступала контроллером и определяла положение манипулятора. В качестве сенсоров для работы перчатки использовали ИППМК-структуры. В таких структурах за счет наличия гибридных электродов улучшается барьерный эффект и уменьшаются поте-

ри электролита через поверхность электрода, что приводит к увеличению времени непрерывной работы, а также гарантирует стабильность, увеличение срока службы и проводимости. Манипулятор был способен дистанционно по Wi-Fi-каналу обеспечивать высокую точность позиционирования с задержкой 0,1 с, захватывать и удерживать предметы массой до 220 г. Такая система будет полезна, например, для людей, которые работают в опасных условиях, лицам с ограниченными возможностями или пожилым людям в их повседневной жизни.

*Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 23-29-00847, <https://rscf.ru/project/23-29-00847/>.*

## Список литературы

1. Патент US 8627740. Robot for harsh outdoor environment / Skourup C., Gunnar J., Pretlove J.; опубл. 14.01.2014.
2. Rahman M. H., Werth H., Goldman A. et al. Recent Progress on Electroactive Polymers: Synthesis, Properties and Applications // Ceramics. 2021. Vol. 4, N. 3. P. 516–541.
3. Zhu Z., Horiuchi T., Kruusamäe K. et al. Influence of Ambient Humidity on the Voltage Response of Ionic Polymer-Metal Composite Sensor // J. Phys. Chem. B. 2016. Vol. 120, N. 12. P. 3215–3225.
4. Khmelnitskiy I. K., Gorodilov V. V., Kalyonov V. E. et al. Investigation of Electromechanical Parameters of IPMC-sensors // Proceedings of the 2018 IEEE Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering (EICoRus), 29 January 2018 – 01 February 2018. Moscow and St. Petersburg, Russia. P. 411–414.
5. Ostretsov K. I., Orekhov Y. D., Khmelnitskiy I. K. et al. Heart Rate Monitor Based on IPMC Sensor // Proceedings of the 2021 International Conference on Electrical Engineering and Photonics (EExPolytech), 14–15 October 2021. St. Petersburg, Russia. P. 139–142.
6. Хмельницкий И. К., Айвазян В. М., Алексеев Н. И. и др. Влияние природы электролита на характеристики ионных ЭАП-сенсоров с металлическими и полимерными электродами // Журнал структурной химии. 2021. Т. 62, № 12. С. 1942–1952.
7. Di Pasquale G., Graziani S., Pollicino A. et al. The Evolution of Ionic Polymer Metal Composites Towards Greener Transducers // IEEE Instrum. Meas. Mag. 2019. Vol. 22, N. 5. P. 30–35.
8. Guo D., Wang L., Wang X. et al. PEDOT coating enhanced electromechanical performances and prolonged stable working time of IPMC actuator // Sens. Actuators B. 2020. Vol. 305. 127488.
9. Adamovich D. S., Aivazyan V. M., Khmelnitskiy I. K. et al. Hybrid PEDOT/Pt Electrodes for Ionic EAP Actuators // Proceedings of the 2022 IEEE Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering (EICoRus), 25–28 January 2022. St. Petersburg, Russia. P. 1002–1005.
10. Di Pasquale G., Fortuna L., Graziani S. et al. A study on IP<sup>2</sup>C actuators using ethylene glycol or EmI-Tf as solvent // Smart Mater. Struct. 2011. Vol. 20, N. 4. 045014.
11. Di Pasquale G., Graziani S., Messina F. G. et al. An investigation of the structure–property relationships in ionic polymer polymer composites (IP<sup>2</sup>Cs) manufactured by polymerization in situ of PEDOT/PSS on Nafion® 117 // Smart Mater. Struct. 2014. Vol. 23, N. 3. 035018.
12. Hu F., Xue Y., Xu J. et al. PEDOT-Based Conducting Polymer Actuators // Front. Robot. AI. 2019. Vol. 6. 114.
13. Bakri A. B., Adnan R., Ruslan F. A. Wireless Hand Gesture Controlled Robotic Arm Via NRF24L01 Transceiver // Proceedings of the 2019 IEEE 9th Symposium on Computer Applications & Industrial Electronics (ISCAIE), 27–28 April 2019. Malaysia. P. 16–22.
14. Langevin G. InMoov — open source 3D printed life-size robot. URL: <https://inmoov.fr> (дата обращения: 28.03.2023).

**D. S. Adamovich**, Junior Researcher, **V. M. Aivazyan**, Junior Researcher,  
**I. K. Khmelnitskiy**, Ph. D., Leading Researcher, khmelnitskiy@gmail.com,  
**V. V. Luchinin**, D. Sc., Principal Researcher, **S. E. Parfenovich**, Engineer, **Yu. D. Orekhov**, Engineer,  
**A. M. Karelina**, Engineer, **E. E. Kholodkova**, Student  
St. Petersburg State Electrotechnical University "LETI" named after V. I. Ulyanov (Lenin),  
St. Petersburg, 197022, Russian Federation

*Corresponding author:*

**Khmelnitskiy Ivan K.**, Ph. D., Leading Researcher, St. Petersburg State Electrotechnical University "LETI" named after V. I. Ulyanov (Lenin), St. Petersburg, 197022, Russian Federation, e-mail: khmelnitskiy@gmail.com

## Manipulator Control Using a Sensor Glove Based on Ionic Electroactive Polymers

Received on March 30, 2023

Accepted on April 10, 2023

*A sensor glove was developed to control a manipulator in the form of a human hand, which could remotely repeat the movements of the operator's fingers, as well as capture and hold objects of various sizes and shapes. Ionic electroactive polymers with hybrid electrodes were used as sensors that ensured the operation of the system. Such structures had greater durability and were characterized by a stable change in resistance during bending.*

**Keywords:** electroactive polymers, sensor glove, manipulator, transmitter, receiver, remote control, servos, controller

*For citation:*

**Adamovich D. S., Aivazyan V. M., Khmelnitskiy I. K., Luchinin V. V., Parfenovich S. E., Orekhov Yu. D., Karelina A. M., Kholodkova E. E.** Manipulator Control Using a Sensor Glove Based on Ionic Electroactive Polymers, *Nano- i mikrosistemnaya tekhnika*, 2023, vol. 25, no. 4, pp. 189–194.

DOI: 10.17587/nmst.25.189-194

### References

1. Patent US 8627740. Robot for harsh outdoor environment / Skourup C., Gunnar J., Pretlove J.; publ. 14.01.2014.
2. Rahman M. H., Werth H., Goldman A. et al. Recent Progress on Electroactive Polymers: Synthesis, Properties and Applications, *Ceramics*, 2021, vol. 4, no. 3, pp. 516–541.
3. Zhu Z., Horiuchi T., Kruusamäe K. et al. Influence of Ambient Humidity on the Voltage Response of Ionic Polymer-Metal Composite Sensor, *J. Phys. Chem. B*, 2016, vol. 120, no. 12, pp. 3215–3225.
4. Khmelnitskiy I. K., Gorodilov V. V., Kalyonov V. E. et al. Investigation of Electromechanical Parameters of IPMC-sensors, *Proceedings of the 2018 IEEE Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering (EIConRus)*, 29 January 2018 – 01 February 2018. Moscow and St. Petersburg, Russia, pp. 411–414.
5. Ostretsov K. I., Orekhov Y. D., Khmelnitskiy I. K. et al. Heart Rate Monitor Based on IPMC Sensor, *Proceedings of the 2021 International Conference on Electrical Engineering and Photonics (EExPolytech)*, 14–15 October 2021. St. Petersburg, Russia, pp. 139–142.
6. Khmelnitskiy I. K., Aivazyan V. M., Alekseev N. I. i dr. Vliyanie prirody elektrolita na kharakteristiki ionnykh EAP-sensorov s metallicheskimi i polimernymi elektrodami, *Zhurnal Strukturnoi Khimii*, 2021, vol. 62, no. 12, pp. 1942–1952 (in Russian).
7. Di Pasquale G., Graziani S., Pollicino A. et al. The Evolution of Ionic Polymer Metal Composites Towards Greener Transducers, *IEEE Instrum. Meas. Mag.*, 2019, vol. 22, no. 5, pp. 30–35.
8. Guo D., Wang L., Wang X. et al. PEDOT coating enhanced electromechanical performances and prolonged stable working time of IPMC actuator, *Sens. Actuators B*, 2020, vol. 305, 127488.
9. Adamovich D. S., Aivazyan V. M., Khmelnitskiy I. K. et al. Hybrid PEDOT/Pt Electrodes for Ionic EAP Actuators, *Proceedings of the 2022 IEEE Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering (EIConRus)*, 25–28 January 2022. St. Petersburg, Russia, pp. 1002–1005.
10. Di Pasquale G., Fortuna L., Graziani S. et al. A study on IP<sup>2</sup>C actuators using ethylene glycol or Emi-Tf as solvent, *Smart Mater. Struct.*, 2011, vol. 20, no. 4, 045014.
11. Di Pasquale G., Graziani S., Messina F. G. et al. An investigation of the structure–property relationships in ionic polymer polymer composites (IP<sup>2</sup>Cs) manufactured by polymerization in situ of PEDOT/PSS on Nafion® 117, *Smart Mater. Struct.*, 2014, vol. 23, no. 3, 035018.
12. Hu F., Xue Y., Xu J. et al. PEDOT-Based Conducting Polymer Actuators, *Front. Robot. AI*, 2019, vol. 6, 114.
13. Bakri A. B., Adnan R., Ruslan F. A. Wireless Hand Gesture Controlled Robotic Arm Via NRF24L01 Transceiver, *Proceedings of the 2019 IEEE 9th Symposium on Computer Applications & Industrial Electronics (ISCAIE)*, 27–28 April 2019. Malaysia, pp. 16–22.
14. Langevin G. InMoov — open source 3D printed life-size robot. URL: <https://inmoov.fr> (accessed on 28.03.2023).

# ПРИМЕНЕНИЕ МНСТ. РАДИОФОТОНИКА

## APPLICATION OF MNST. MICROWAVE-PHOTONICS

УДК 621.373.826: 621.375.8

DOI: 10.17587/nmst.25.195-200

**М. Е. Белкин**, д-р техн. наук, зав. науч.-технол. лаборатории, e-mail: Belkin@mirea.ru  
МИРЭА — Российский технологический университет, Москва, 119454

## РАДИОФОТОННЫЙ ПОДХОД В РАЗРАБОТКЕ НОВОГО ПОКОЛЕНИЯ СВЧ РАДИОЭЛЕКТРОННЫХ УСТРОЙСТВ И СИСТЕМ

Поступила в редакцию 16 мая 2023 г.

*Кратко рассмотрены: общий принцип построения радиофотонного узла в составе современной и перспективной радиоэлектронной аппаратуры с использованием радиофотонного подхода; применяемые в радиофотонике компонентная база и узлы; современные промышленные отрасли радиоэлектроники на базе радиофотонного подхода, включая шесть интенсивно развивающихся в последние годы отраслей, связанных с РЭА, — безопасность, телекоммуникации, вычислительная техника, радиолокация, радиоэлектронное противодействие и измерительная техника, перспективные направления их развития, а также причины возникновения, история развития и уровень современного состояния радиофотоники.*

**Ключевые слова:** сверхвысокочастотный диапазон, радиоэлектронная аппаратура, радиофотонный подход, общий принцип построения, оптические и оптоэлектронные компонентная база и узлы, современные промышленные отрасли радиоэлектроники, перспективные направления развития

### Введение

Анализ перспектив мирового развития радиоэлектронной промышленности убедительно показывает, что одним из наиболее эффективных путей комплексного решения стратегически важной проблемы, заключающейся в повышении рабочего диапазона частот, расширении мгновенной частотной полосы, улучшении пропускной способности, массогабаритных и стоимостных характеристик, энергопотребления, надежности современных радиоэлектронных систем (РЭС) сверхвысокочастотного (СВЧ) диапазона гражданского и военного назначений, является применение для формирования и обработки радиосигналов методов и подходов радиофотоники (микроволновой фотоники). Радиофотоника — новое междисциплинарное направление, созданное на стыке СВЧ радиоэлектроники и фотоники. Реализация данного подхода в РЭС СВЧ диапазона помимо значительно улучшения указанных технико-экономических показателей дополнительно приведет к улучшению таких важных характеристик РЭС двойного назначения, как многофункциональность, электромагнитная

совместимость, стойкость к внешним воздействиям (в том числе преднамеренным), экологичность.

Актуальность и необходимость скорейшего внедрения (промышленного освоения) радиофотонной технологии в нашей стране определяются:

— приоритетом направления "радиофотоника" для технологического развития отрасли электронной и радиоэлектронной промышленности в Государственной Программе Российской Федерации "Развитие электронной и радиоэлектронной промышленности на 2013—2025 годы" (утверждена распоряжением Правительства РФ от 15 декабря 2012 г. № 2396-р);

— возможностью преодоления технических, технологических, ресурсных, экологических и других ограничений в отечественной радиоэлектронной промышленности;

— отсутствием широкой возможности воспользоваться существующими решениями, методами, технологиями, созданных в зарубежных странах.

Устройства и узлы радиоэлектронной аппаратуры СВЧ диапазона на базе фотонной и радиофотонной технологий, в том числе устройства обработки радио-

сигналов, а также радиоэлектронные системы двойного назначения с применением радиофотоники широко исследуют и разрабатывают в университетах и научных секторах крупных фирм промышленно развитых зарубежных стран (например, [1, 2]). Однако данное направление пока очень слабо развивается в России. Для поиска путей и создания условий его преодоления в последние годы Академией наук РФ, Минпромторгом РФ и Фондом перспективных исследований разработаны программы и дорожная карта развития отечественной радиофотоники. Реализация намеченных планов в настоящее время осуществляется целым рядом университетов, учреждений Российской академии наук и предприятий радиоэлектронной промышленности. По результатам проведенных исследований опубликованы работы преимущественно обзорного или прогнозного характера в научных и популярных отечественных журналах и конференционных сборниках [3–7]. Кроме того, в издательстве "Техносфера" вышла книга "Основы микроволновой фотоники" [8], представляющая собой перевод изданного в 2015 г. WILEY одного из первых фундаментальных трудов по радиофотонике, в котором последовательно описаны ее физические основы и результаты исследований и разработок компонентной базы и аппаратуры.

В настоящее время уже можно подвести первые итоги отечественного развития радиофотоники, включая разработки в области оптоэлектронной и оптической компонентной базы и примеры разработок радиоэлектронной аппаратуры (РЭА) с применением радиофотонного подхода в отраслях телекоммуникации, безопасности, радиолокации, измерительной и вычислительной техники. Приходится отметить, что практически все исследования и разработки выполнены авторами либо в инициативном порядке, либо с не обеспечиваемым дальнейшее развитие темы уровнем финансовой поддержки (например, в рамках гранта РФФИ). Практически отсутствие специальной государственной финансовой поддержки данного междисциплинарного направления уже привело к многолетнему отставанию отечественного развития радиофотоники. Важная составляющая ускоренного

развития отечественной радиофотоники заключается в широкой подготовке специализированных научных и технических кадров. В этом направлении пионером стал МИРЭА — Российский технологический университет (РТУ МИРЭА), в котором в течение 5 лет проводилась профессиональная переподготовка радиоинженеров ведущих предприятий Москвы и Московской области по программе "Фотоника и радиофотоника в радиоэлектронных системах сверхвысокочастотного диапазона". Обучение было прервано в 2021 г. вследствие пандемии и его до сих пор не удается возобновить.

В целях лучшего понимания основ радиофотоники, а также значимости результатов публикуемых разработок в данной статье рассмотрен общий принцип построения радиофотонного узла в составе РЭА, дана классификация применяемых в радиофотонной аппаратуре компонентной базы и узлов, кратко описаны причины возникновения, история развития и уровень современного состояния радиофотоники, а также промышленные отрасли, в которых уже нашел применение радиофотонный подход.

### Принцип построения радиофотонного узла в составе РЭА

Общий принцип построения радиофотонного узла в составе РЭА на базе радиофотонного подхода поясняется на рис. 1.

Входной радиосигнал СВЧ диапазона посредством электрооптического преобразования (ЭОП) конвертируется в оптический диапазон. Модулированный оптический сигнал с помощью волоконно-оптических либо интегрально-оптических узлов и устройств соответствующим образом коммутируется, фильтруется, усиливается, преобразуется по частоте, задерживается либо просто передается в удаленную точку аппаратуры, где осуществляется обратное оптико-электрическое преобразование (ОЭП) в радиодиапазон.

Анализ результатов исследований и разработок показывает, что использующая радиофотонный принцип радиоэлектронная аппаратура способна функционировать в четырех частотных диапазонах: в полосах модулирующих, промежуточных, несущих частот радиодиапазона (включая СВЧ, КВЧ и ТГц диапазоны) и в полосе оптического диапазона (точнее, ближнего ИК диапазона). А именно, в оптическом диапазоне согласно рекомендациям ITU-T G.692 и ОСТ 45.178–2001 могут быть использованы три окна прозрачности кварцевого световода в районе 0,85; 1,3 и 1,55 мкм. Из них наименьшие потери пропускания (порядка 0,2 дБ/км) и наиболее широкая полоса длин волн (1530...1612 нм, что соответствует 186...196 ТГц) наблюдается в так

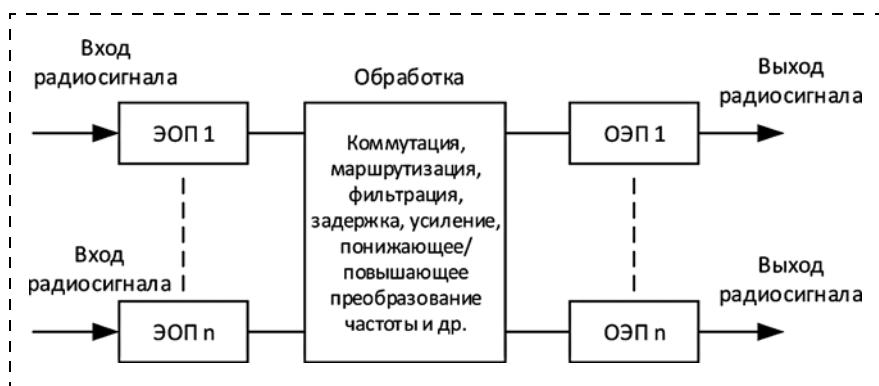


Рис. 1. Общий принцип построения радиофотонного узла в составе РЭА на базе радиофотонного подхода

называемых *C*- и *L*-спектральных полосах третьего окна прозрачности, где и сосредоточена наибольшая активность в разработке телекоммуникационных волоконно-оптических систем.

В данной сверхширокой полосе (8 декад) к компонентной базе и схемотехническим принципам построения стандартной радиоаппаратуры предъявляют самые разнообразные, часто противоречивые требования, что делает весьма привлекательным упрощение схематики за счет широкого использования радиофотонных принципов, основанных на прямом взаимодействии СВЧ и оптического излучений. В частности, применение описанного выше ИК диапазона в узле обработки РЭА, базирующейся на радиофотонном принципе, обеспечивает возможность параллельной обработки передаваемых радиосигналов с дополнительным использованием, так называемого принципа спектрального разделения каналов (СРК). Благодаря применению СРК стала возможной одновременная высококачественная передача с помощью самого простого формата модуляции по интенсивности излучения, который соответствует формату амплитудной модуляции в радиотехнике, до 100 радиоканалов с шагом оптических несущих 50 либо 100 ГГц.

### Применяемые компонентная база и узлы

Общая классификация компонентной базы, применяемой в любой РЭА на базе радиофотонного подхода, приведена на рис. 2.

Как следует из рис. 2, у радиофотоники отсутствует собственная компонентная база. А именно, радиофотонную РЭА необходимо разрабатывать на основе традиционной электронной компонентной базы (ЭКБ), включающей активную ЭКБ (АЭКБ) и пассивную ЭКБ (ПЭКБ) с добавлением в трактах ЭОП, обработки и ОЭП (см. рис. 1) фотонной компонентной базы (ФКБ), включающей оптоэлектронную компонентную базу (ОЭКБ) и оптическую компонентную базу (ОКБ). В состав ОЭКБ (например, полупроводниковый лазерный диод, полупроводниковый фотодиод, оптический модулятор) входят только активные компоненты, т. е. ее определяющим признаком, как и в ЭКБ, является наличие порта ввода источника постоянного тока. Вместе с тем в состав ОКБ входят как активные (например, волоконный либо полупроводниковый оптический усилитель), так и пассивные (например, оптические разветвитель, переключатель, фильтр, изолятор, циркулятор, волоконный либо интегральный световод и др.) компоненты.

Дальнейшее развитие радиофотонного подхода привело к созданию как фотонных, так и радиофотонных узлов, в которых комбинируются компоненты ЭКБ и описанные выше компоненты ФКБ. Типичным примером реализации фотонного узла являются оптические мультиплексор и демультиплексор, по сути, представляющие собой набор соответствующим образом соединенных оптических разветвителей и фильтров. Наиболее важным примером радио-

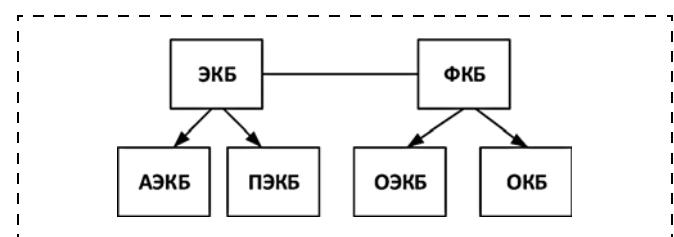


Рис. 2. Классификация компонентной базы

фотонного узла является оптоэлектронный генератор [9–12], схемы которого построены путем сочетания компонентов ЭКБ и ФКБ. Актуальность его применения в современных и перспективных РЭА обосновывается значительным улучшением ключевых параметров по сравнению с СВЧ электронными аналогами.

Еще один важный шаг в развитии ФКБ заключается в модернизации среды передачи оптических сигналов, в качестве которой первоначально использовался только волоконный световод, содержащий расположенную внутри оболочки единственную сердцевину, служащую каналом распространения электромагнитной волны оптического диапазона. Идея заключалась в размещении внутри оболочки дополнительных сердцевин [13]. Данный технологический подход привел к существенному улучшению компактности радиофотонного устройства, что убедительно показано на примерах разработки многоканального волоконно-оптического устройства задержки радиосигналов [14] и многосердцевинного волоконного усилителя [15].

Наконец, пожалуй, эпохальным шагом явился интегральный подход к построению радиофотонного узла, который привел к созданию, как и много лет назад в электронике, фотонных и радиофотонных интегральных схем (ФИС и РФИС). Основным потенциальным преимуществом его является компактность РЭА на базе радиофотонного подхода, что реализуется за счет замены волоконных световодов на интегральные волноводы [16]. Данное направление в последние 10 лет получило интенсивное развитие за рубежом, в результате созданы, например, интегральный оптоэлектронный генератор [17] и интегральный радиофотонный локатор, обеспечивающий высокоразрешающий мониторинг объектов наблюдения [18].

### Современные промышленные отрасли радиоэлектроники и перспективные направления их развития

Диаграмма, показывающая современные промышленные отрасли внедрения радиофотонной технологии и направления их развития, приведена на рис. 3 (см. четвертую сторону обложки).

Данные для диаграммы получены на основе собственного многолетнего опыта разработки аппаратуры телекоммуникационных волоконно-оптических систем, РЭА на базе радиофотонного подхода, а также по

результатам изучения последних зарубежных разработок в этой области. Как следует из рис. 3, радиофотонная технология уже получила развитие в шести интенсивно развивающихся в последние годы промышленных отраслях, связанных с РЭА, включая безопасность, телекоммуникации, вычислительную технику, радиолокацию, радиоэлектронное противодействие (РЭП) и измерительную технику. Рис. 3 также содержит прогноз наиболее востребованных в каждой из отраслей направлений разработки РЭА с применением радиофотонного подхода. Красным шрифтом отмечены направления, в разработке аппаратуры для которых наша команда уже приняла участие.

Понятно, что наибольшее число направлений, требующих скорейшего развития, относится к телекоммуникационной отрасли, что связано с интенсивным мировым развитием в последние годы сотовых телекоммуникационных сетей пятого и шестого поколений (5G и 6G). Опыт внедрения в РФ сотовых телекоммуникационных сетей предыдущих поколений показывает маловероятность того, что в связи с отсутствием в настоящее время в стране мирового лидера по разработке и производству сверхскоростной аппаратуры волоконно-оптических систем транспортные подсети 5G будут строить на базе отечественного оборудования. Однако есть возможность принять серьезное участие в разработке и последующем производстве аппаратуры на основе радиофотонного подхода для базовых станций подсетей доступа, особенность которых состоит в волоконно-беспроводной архитектуре, что явилось следствием применения в сетях 5G для радиосвязи с фиксированными и мобильными пользователями нового частотного плана в миллиметровом диапазоне волн [19]. Тем более, что помимо стандартного применения в сетях российских мегаполисов, на базе принципов построения сети 5G начали развиваться специализированные телекоммуникационные сети различного назначения (см. рис. 3 на четвертой стороне обложки).

В дополнение, с помощью рис. 3 можно получить представление о других перспективных задачах радиофотоники, решаемых в настоящее время мировым научным сообществом, в остальных современных отраслях радиоэлектроники.

### **Причины возникновения, история развития и уровень современного состояния**

Как следует из предыдущего материала, микроволновая фотоника представляет собой междисциплинарную область знаний, охватывающую фотонику, оптоэлектронику и СВЧ радиоэлектронику. Причина возникновения данного направления связана с необходимостью решения постоянно усложняющихся инженерно-технических задач, заставивших радиоинженеров в поисках новых возможностей, в основном связанных с постоянно растущими требованиями к расширению мгновенной полосы обработки сигналов, выйти за пределы своей дисциплины и обратиться к оптическому диапазону. В общем, радиофо-

тоника естественным образом связана с ее основами и развивается на базе современных потребностей радиосистем различного назначения. Тем не менее технологии создания ее компонентной базы и узлов требуют развития во множестве областей фундаментальных исследований. В частности, хотя в современных радиосистемах все больше и больше применяется цифровая обработка сигналов (ЦОС), сверхширокополосная аналоговая обработка в оптическом диапазоне также является важным и практическим инструментальным средством для радиоинженера в разработке указанных выше радиосистем. Возможность обработки сигнала в аналоговой среде может упростить общее системное проектирование, особенно в сверхширокополосных системах, где требования к полосе пропускания сложно удовлетворить с помощью только средств ЦОС. Однако, чтобы обеспечить максимальные эффективность и производительность, разработчик РЭА с применением радиофотонного подхода должен выбрать соответствующие аппаратурные средства, наилучшим образом сочетающиеся с характеристиками современных средств ЦОС, что является общей первоочередной задачей современного развития радиофотоники.

Хотя микроволновая фотоника как область знаний не была формально признана в международном масштабе вплоть до конца 80-х — начала 90-х годов прошлого столетия [20], история ее развития началась в конце 70-х годов и продолжается уже более 40 лет с постоянно растущей интенсивностью, связанной с развитием РЭА в указанных на рис. 3 критических отраслях промышленности.

Мировой уровень современного состояния радиофотоники можно корректно оценить по объему публикаций о результатах новых научно-технических исследований и разработок в данной области в самой крупной мировой научной базе IEEE Xplore. Изучение этого вопроса показало, что число публикаций по микроволновой фотонике в настоящее время приближается к 100 тысячам с ежегодным приростом в последние 10 лет более 2 тысяч. Судя по принадлежности их авторов, наиболее активно данная область развивается в странах Европы (Италия, Испания, Великобритания, Германия), Юго-Восточной Азии (Китай, Япония) и Северной Америки (США, Канада).

### **Заключение**

В данной работе кратко описаны: общий принцип построения радиофотонного узла в составе РЭА; применяемая в радиофотонике компонентная база и узлы; современные промышленные отрасли радиоэлектроники, в которых необходим радиофотонный подход, и перспективные направления их развития; а также причины возникновения, история развития и уровень современного состояния радиофотоники.

В дальнейшем в этом разделе журнала "Нано- и микросистемная техника" будут рассмотрены результаты отечественных разработок в области применяемых в радиофотонике оптоэлектронной и оптической

компонентной базы и фотонных узлов, а также примеры выполненных разработок с применением радиофотонного подхода в отраслях телекоммуникации, безопасности, радиолокации, измерительной и вычислительной техники.

### Список литературы

1. Capmany J., Novak D. Microwave photonics combines two worlds // Nature Photonics. 2007. Vol. 1. P. 319–330.
2. Yao J. Microwave Photonics // IEEE J. of Lightwave Technol. 2009. Vol. 27, N. 3. P. 314–335.
3. Галицын А., Егоров В., Егоров Е. Радиофотоника — передний край обороны страны // Современная электроника. 2021. № 8. С. 50–60.
4. Белкин М. Е., Сигов А. С. Новое направление фотоники — сверхвысокочастотная оптоэлектроника // Радиотехника и электроника. 2009. Т. 54, № 8. С. 901–914.
5. Белкин М. Е., Сигов А. С., Кудж С. А. Новые принципы построения радиоэлектронной аппаратуры СВЧ диапазона с использованием радиофотонной технологии // Российский технологический журнал. 2016. № 1 (10). С. 4–20.
6. Зайцев Д. Ф., Андреев В. М., Биленко И. А. и др. Первая радиофотонная фазированная антенна решетка // Радиотехника. 2021. Т. 85, № 4. С. 153–164.
7. Голов Н. А., Усачев В. А., Боев С. Ф., Савченко В. П., Шулунов А. Н., Зубарев Ю. Б. Эволюция радиофотоники и перспективы ее применения в радиолокации // РТИ Системы ВКО — 2017: Труды V Всероссийской научно-технической конференции.
8. Урик В. Д., МакКинни Д. Д., Вильямс К. Д. Основы микроволновой фотоники // Пер. с англ. под ред. С. Ф. Боева, А. С. Сигова. М.: Техносфера, 2016. 376 с.
9. Yao X. S. Opto-electronic Oscillators // In book: RF Photonic Technology in Optical Fiber Links / Ed. by W. S. C. Chang. Cambridge University Press, 2002. P. 255–292.
10. Belkin M. E., Loparev A., Semenova Y., Farrell G., Sigov A. S. A Tunable RF-Band Optoelectronic Oscillator and OE-CAD Model for its Simulation. Microwave and Optical Technology Letters. 2011. Vol. 53, N. 11. P. 2474–2477.
11. Белкин М. Е., Лопарев А. В. Оптоэлектронный генератор СВЧ сигналов: моделирование, исследование спектральных и шумовых характеристик // Нано- и микросистемная техника. 2011. № 9. С. 29–33.
12. Belkin M. E., Zhukov L., Smirnov N. Designing a compact tunable optoelectronic oscillator based on bimodal VCSEL // International Topical Meeting on Microwave Photonics (MWP2021) 15–17 November 2021, 4 p.
13. Matsuo S. et al. High-Spatial-Multiplicity Multi-Core Fibres for Future Dense Space-Division-Multiplexing System // European Conference on Optical Communication ECOC'2015.
14. Egorova O. N., Astapovich M. S., Belkin M. E., Semenov S. L. Fiber-optic delay line using multicore fiber // Bulletin of the Lebedev Physics Institute. 2017. Vol. 44 (1). P. 5–7.
15. Jain F., et al. 32-core Inline Multicore Fiber Amplifier for Dense Space Division Multiplexed Transmission Systems // 42nd European Conference and Exhibition on Optical Communications. September 18–22, 2016, Düsseldorf. P. 1–3.
16. Yao J. Photonic Integrated Circuits for Microwave Photonics // 2018 Conference on Lasers and Electro-Optics Pacific Rim (CLEO-PR).
17. Zhang W., Yao J. A silicon photonic integrated frequency-tunable optoelectronic oscillator // 2017 International Topical Meeting on Microwave Photonics (MWP), December 2017, Beijing, China.
18. Li S. et al. Chip-Based Microwave-Photonic Radar for High-Resolution Imaging // Laser and Photonics Rev. 2020. Vol. 14. 1900239. 6 p.
19. Belkin M. E. The Building Principles of a Cost- and Power-Efficient Base Station for Emerging Fiber-Wireless Networks. International Conference on Microwaves, Communications, Antennas and Electronic Systems, COMCAS 2017. P. 1–4. Tel Aviv, Israel, 13–15 Nov. 2017.
20. Berceli T., Herczfeld P. R. Microwave photonics — a historical perspective // IEEE Trans. on Microwave Theory and Techniques. 2010. Vol. 58, N. 11. P. 2992–3000.

---

**M. E. Belkin, D. Sc., Head of Laboratory,  
MIREA — Russian Technological University, Moscow, 119454, Russian Federation**

Corresponding author:

**Mikhail E. Belkin, D. Sc., Head of Laboratory, MIREA — Russian Technological University, Moscow, 119454, Russian Federation**  
e-mail: Belkin@mirea.ru

## Microwave-Photonics Approach in Developing a New Generation of Microwave-Electronics Devices and Systems

Received on May 16, 2023

Accepted on May 23, 2023

*This paper briefly discusses: the general principle of designing a microwave-photonics (MWP) unit as a part of modern and advanced microwave-electronic equipment using the MWP approach, the component base and nodes used in MWP, modern industrial sectors of microwave electronics based on the MWP approach, including six industry branches that have been intensively developing in recent years, such as security, telecommunications, computer technology, radar, electronic countermeasures and measuring equipment, promising directions of their development, as well as the causes of occurrence, the history of development and the level of MWP current state.*

**Keywords:** microwave band, microwave-electronic equipment, microwave-photonics approach, general principle of designing, optical and optoelectronic component base and nodes, modern industrial branches of microwave electronics, promising directions of development

*For citation:*

**Belkin M. E.** Microwave-Photonics Approach in Developing a New Generation of Microwave-Electronics Devices and Systems, *Nano- i mikrosistemnaya tekhnika*, 2023, vol. 25, no. 4, pp. 195–200.

DOI: 10.17587/nmst.25.195-200

## References

1. Capmany J., Novak D. Microwave photonics combines two worlds, *Nature Photonics*, 2007, vol. 1, pp. 319–330.
2. Yao J. Microwave Photonics, *IEEE J. of Lightwave Technol.*, 2009, vol. 27, no. 3, pp. 314–335.
3. Galitsin A., Egorov V., Egorov E. Radio-photonics — the front line of the country's defense, *Modern Electronics*, 2021, no. 8, pp. 50–60 (in Russian).
4. Belkin M. E., Sigov A. S. A new direction in photonics is microwave optoelectronics, *Radio Engineering and Electronics*, 2009, vol. 54, no. 8, pp. 901–914 (in Russian).
5. Belkin M. E., Sigov A. S., Kudzh S. A. New principles for designing microwave radio electronic equipment using microwave photonics technology, *Russian Technological Journal*, 2016, no. 1 (10), pp. 4–20 (in Russian).
6. Zaitsev D. F., Andreev V. M., Bilenko I. A. et al. The first microwave-photonics phased antenna array, *Radiotekhnika*, 2021, vol. 85, no. 4, pp. 153–164.
7. Golov N. A., Usachev V. A., Boev S. F., Savchenko V. P., Shulunov A. N., Zubarev Yu. B. The evolution of microwave photonics and the prospects for its application in radars, *RTI Systems VKO — 2017: Proceedings of the V All-Russian scientific and technical Conference*.
8. Urik V. D., McKinney D. D., Williams K. D. Fundamentals of microwave photonics, *Trans. from English*. Ed. by S. F. Boev, A. S. Sigov. Moscow, Technosfera, 2016. 376 p.
9. Yao X. S. Opto-electronic Oscillators, In: book: *RF Photonic Technology in Optical Fiber Links* / Ed. by W. S. C. Chang, Cambridge University Press, 2002, pp. 255–292.
10. Belkin M. E., Loparev A., Semenova Y., Farrell G., Sigov A. S. A Tunable RF-Band Optoelectronic Oscillator and OE-CAD Model for its Simulation, *Microwave and Optical Technology Letters*, 2011, v. 53, no. 11, pp. 2474–2477.
11. Belkin M. E., Loparev A. V. Optoelectronic microwave-signal oscillator: modeling, investigation of spectral and noise characteristics, *Nano- i mikrosistemnaya tekhnika*, 2011, no. 9, pp. 29–33 (in Russian).
12. Belkin M. E., Zhukov L., Smirnov N. Designing a compact tunable optoelectronic oscillator based on bimodal VCSEL, International Topical Meeting on Microwave Photonics (MWP2021) 15–17 November 2021, 4 p.
13. Matsuo S. et al. High-Spatial-Multiplicity Multi-Core Fibres for Future Dense Space-Division-Multiplexing System, *Proc. European Conference on Optical Communication ECOC 2015*.
14. Egorova O. N., Astapovich M. S., Belkin M. E., Semenov S. L. Fiber-optic delay line using multicore fiber, *Bulletin of the Lebedev Physics Institute*, 2017, vol. 44 (1), pp. 5–7.
15. Jain F. et al. 32-core Inline Multicore Fiber Amplifier for Dense Space Division Multiplexed Transmission Systems, *Proc. on 42nd European Conference and Exhibition on Optical Communications*, September 18–22, 2016, Düsseldorf, pp. 1–3.
16. Yao J. Photonic Integrated Circuits for Microwave Photonics, *2018 Conference on Lasers and Electro-Optics Pacific Rim (CLEO-PR)*.
17. Zhang W., Yao J. A silicon photonic integrated frequency-tunable optoelectronic oscillator, 2017 International Topical Meeting on Microwave Photonics (MWP), December 2017, Beijing, China.
18. Li S. et al. Chip-Based Microwave-Photonic Radar for High-Resolution Imaging, *Laser and Photonics Rev.*, 2020, vol. 14, 1900239, 6 p.
19. Belkin M. E. The Building Principles of a Cost- and Power-Efficient Base Station for Emerging Fiber-Wireless Networks, *Proc. on International Conference on Microwaves, Communications, Antennas and Electronic Systems*, COMCAS 2017, Tel Aviv, Israel, 13–15 Nov. 2017, pp. 1–4.
20. Berceli T., Herefeld P. R. "Microwave photonics—a historical perspective, *IEEE Trans. on Microwave Theory and Techniques*, 2010, vol. 58, no. 11, pp. 2992–3000.

Адрес редакции журнала: 107076, Москва, ул. Матросская Тишина, д. 23, стр. 2, оф. 45. Телефон редакции журнала **8(499) 270-1652**. 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.

Сдано в набор 14.06.2023. Подписано в печать 21.07.2023. Формат 60×88 1/8. Заказ МС423. Цена договорная  
Оригинал-макет ООО «Адвансед солюшнз». Отпечатано в ООО «Адвансед солюшнз». 119071, г. Москва, Ленинский пр-т, д. 19, стр. 1. Сайт: [www.aov.ru](http://www.aov.ru)

Рисунки к статье А. С. Ефимова, А. М. Темнова, А. А. Зайцева, Д. Д. Корольковой, А. Н. Пашкова, Т. М. Есиповой, Н. А. Шарапова, К. В. Дудинова, А. С. Курочки, Р. Г. Белова  
**«СИСТЕМА Au-Sn ДЛЯ МОНТАЖА КРИСТАЛЛОВ НА ПЛАСТИНЕ В МИКРОЭЛЕКТРОНИКЕ СВЧ МЕТОДОМ ВЗАЙМОЙ ПЕРЕХОДНОЙ ДИФФУЗИИ»**

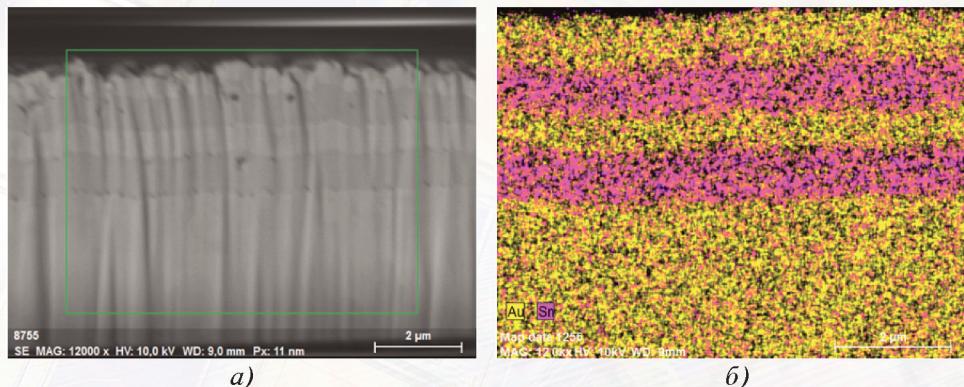


Рис. 6. Фотография шлифа образца с системой слоев Au-Sn (а) и картирование по элементам покрытия по сечению (б)

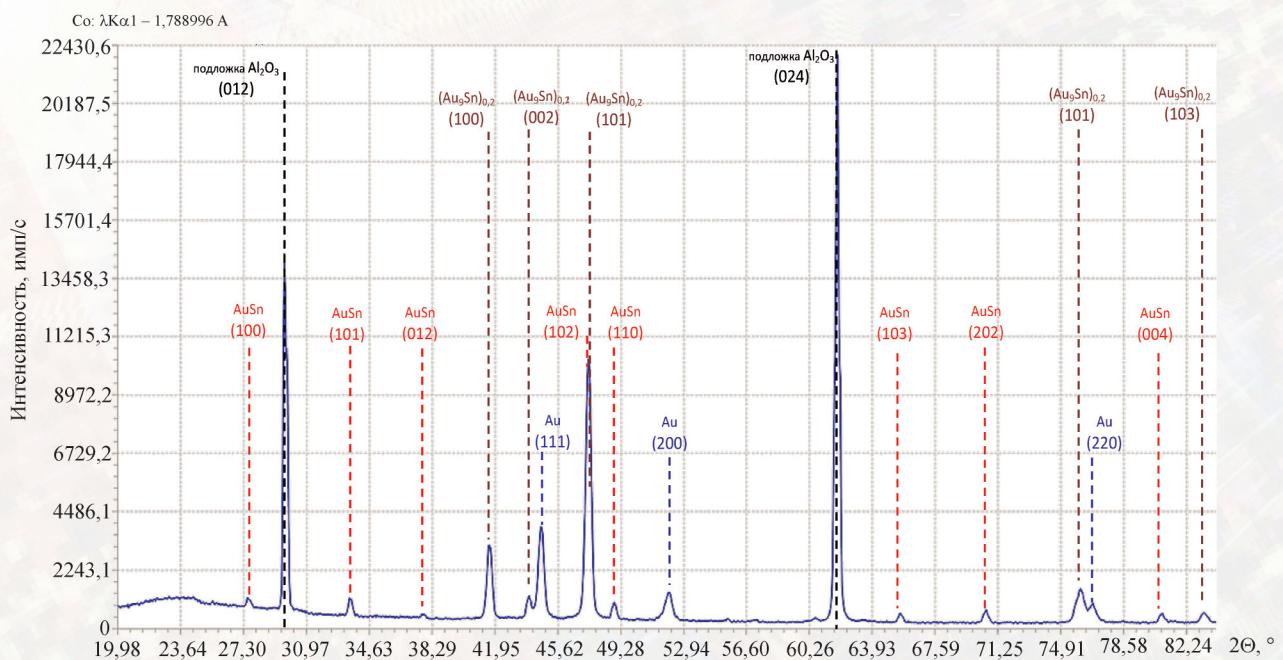


Рис. 7. Дифрактограмма образца сапфира с нанесенной системой металлизации Ti-Au-Sn-Au-Sn-Au

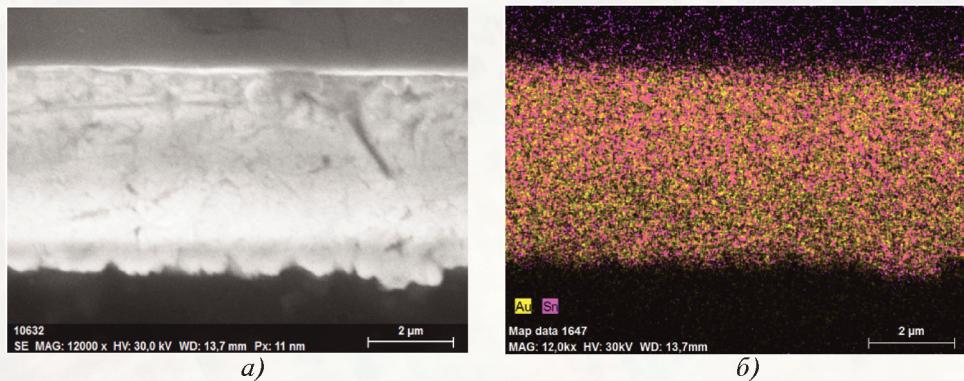


Рис. 9. Фотография поперечного сечения образца с системой слоев Au-Sn после термообработки (а) и картирование покрытия по сечению (б)

Рисунок к статье А. С. Ефимова, А. М. Темнова, А. А. Зайцева, Д. Д. Корольковой, А. Н. Пашкова, Т. М. Есиповой, Н. А. Шарапова, К. В. Дудинова, А. С. Курочки, Р. Г. Белова

## «СИСТЕМА Au-Sn ДЛЯ МОНТАЖА КРИСТАЛЛОВ НА ПЛАСТИНЕ В МИКРОЭЛЕКТРОНИКЕ СВЧ МЕТОДОМ ВЗАЙМОЙ ПЕРЕХОДНОЙ ДИФФУЗИИ»

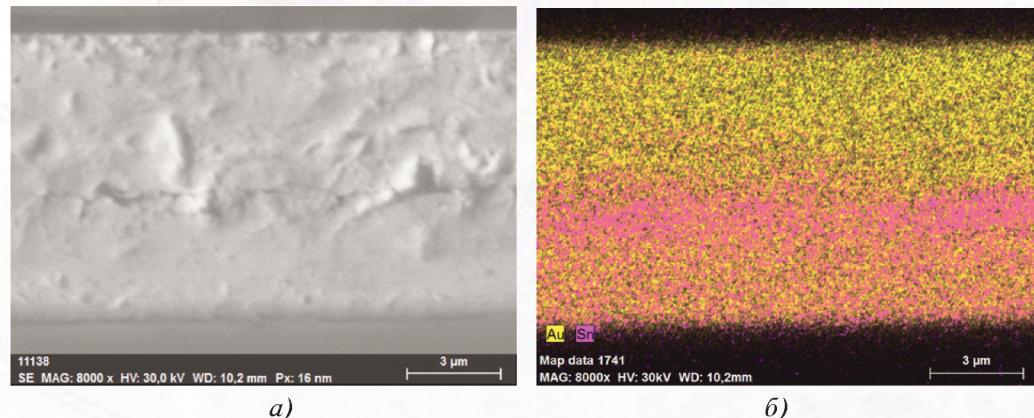


Рис. 14. Фотография поперечного сечения смонтированных кристаллов методом взаимной переходной диффузии (а) и картирование соединения по сечению (б)

Рисунок к статье М. Е. Белкина  
«РАДИОФОТОННЫЙ ПОДХОД В РАЗРАБОТКЕ НОВОГО ПОКОЛЕНИЯ СВЧ РАДИОЭЛЕКТРОННЫХ УСТРОЙСТВ И СИСТЕМ»



Рис. 3. Современные промышленные отрасли и перспективные направления разработок РЭА с использованием радиофотонного подхода