

ISSN 1813-8586

# НАНО-И МИКРОСИСТЕМНАЯ ТЕХНИКА

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

Том 24, № 6, 2022



# 2023

## ЯНВАРЬ

ПН	ВТ	СР	ЧТ	ПТ	СБ	ВС
					1	
2	3	4	5	6	7	8
9	10	11	12	13	14	15
16	17	18	19	20	21	22
23	24	25	26	27	28	29
30	31					

## ФЕВРАЛЬ

ПН	ВТ	СР	ЧТ	ПТ	СБ	ВС
		1	2	3	4	5
6	7	8	9	10	11	12
13	14	15	16	17	18	19
20	21	22	23	24	25	26
27	28					

## МАРТ

ПН	ВТ	СР	ЧТ	ПТ	СБ	ВС
		1	2	3	4	5
6	7	8	9	10	11	12
13	14	15	16	17	18	19
20	21	22	23	24	25	26
27	28	29	30	31		

## АПРЕЛЬ

ПН	ВТ	СР	ЧТ	ПТ	СБ	ВС
					1	2
3	4	5	6	7	8	9
10	11	12	13	14	15	16
17	18	19	20	21	22	23
24	25	26	27	28	29	30

## МАЙ

ПН	ВТ	СР	ЧТ	ПТ	СБ	ВС
1	2	3	4	5	6	7
8	9	10	11	12	13	14
15	16	17	18	19	20	21
22	23	24	25	26	27	28
29	30	31				

## ИЮНЬ

ПН	ВТ	СР	ЧТ	ПТ	СБ	ВС
			1	2	3	4
5	6	7	8	9	10	11
12	13	14	15	16	17	18
19	20	21	22	23	24	25
26	27	28	29	30		

## ИЮЛЬ

ПН	ВТ	СР	ЧТ	ПТ	СБ	ВС
					1	2
3	4	5	6	7	8	9
10	11	12	13	14	15	16
17	18	19	20	21	22	23
24	25	26	27	28	29	30
31						

## АВГУСТ

ПН	ВТ	СР	ЧТ	ПТ	СБ	ВС
	1	2	3	4	5	6
7	8	9	10	11	12	13
14	15	16	17	18	19	20
21	22	23	24	25	26	27
28	29	30	31			

## СЕНТЯБРЬ

ПН	ВТ	СР	ЧТ	ПТ	СБ	ВС	
					1	2	3
4	5	6	7	8	9	10	
11	12	13	14	15	16	17	
18	19	20	21	22	23	24	
25	26	27	28	29	30		

## ОКТАБРЬ

ПН	ВТ	СР	ЧТ	ПТ	СБ	ВС
					1	
2	3	4	5	6	7	8
9	10	11	12	13	14	15
16	17	18	19	20	21	22
23	24	25	26	27	28	29
30	31					

## НОЯБРЬ

ПН	ВТ	СР	ЧТ	ПТ	СБ	ВС
		1	2	3	4	5
6	7	8	9	10	11	12
13	14	15	16	17	18	19
20	21	22	23	24	25	26
27	28	29	30			

## ДЕКАБРЬ

ПН	ВТ	СР	ЧТ	ПТ	СБ	ВС	
					1	2	3
4	5	6	7	8	9	10	
11	12	13	14	15	16	17	
18	19	20	21	22	23	24	
25	26	27	28	29	30	31	

# НАНО- и МИКРОСИСТЕМНАЯ ТЕХНИКА

Том 24. № 6 ✦ 2022

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.)

и 2.2.2. Электронная компонентная база микро- и нанoeлектроники, квантовых устройств (физ.-мат., техн.).

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

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.

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.)

Шетинкин Д. А. (сайт)

## СОДЕРЖАНИЕ

### НАНОТЕХНОЛОГИИ И ЗОНДОВАЯ МИКРОСКОПИЯ

Лемешко П. С., Спивак Ю. М., Мошников В. А. Возможности мультифотонной микроскопии в исследованиях полупроводниковых наноматериалов . . . . . 271

Шапошников С. С. Исследование автоэмиссионных свойств многоэмиттерных катодов из углеродных нанотрубок . . . . . 279

### МАТЕРИАЛОВЕДЧЕСКИЕ И ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ МНСТ

Климов Е. А., Пушкарев С. С., Клочков А. Н. Влияние встроенного пьезоэлектрического поля на спектры фотолюминесценции упруго напряженных сверхрешеток InGaAs/GaAs на подложках GaAs (110) и (111)A . . . . . 283

Филиппов И. А., Пронин И. А., Китаев А. С. Влияние температуры спекания порошка оксида цинка на варисторные свойства структур на его основе . . . . . 288

### ЭЛЕМЕНТЫ МНСТ

Рыддин Е. А., Маврин И. А., Андреева Н. В., Лучинин В. В. Нейроморфный электронный модуль, ориентированный на использование мемристорной ЭКБ, для распознавания изображений . . . . . 293

Зарянкин Н. М., Кочурина Е. С., Виноградов А. И., Боев Л. Р., Анчутин С. А., Тимошенков А. С., Тимошенков С. П. Разработка и исследование микромеханического датчика вращения . . . . . 303

Дайнеко А. В., Никифоров В. Г. Обзор состояния и перспектив развития и применения отечественных многослойных пьезоактюаторов для ракетно-космической техники и наземной космической инфраструктуры . . . . . 307

Указатель статей, опубликованных в журнале "Нано- и микросистемная техника" в 2022 г. . . . . 323

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. 24

No. 6

2022

## 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  
 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.  
 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

### NANOTECHNOLOGY AND SCANNING PROBE MICROSCOPY

- Lemeshko P. S., Spivak Yu. M., Moshnikov V. A.** Possibilities of Multi-photon Microscopy in Semiconductor Nanomaterials Research . . . . . 271
- Shaposhnikov S. S.** Investigation of Field Emission Properties of Multi-Emitter Carbon Nanotube Cathodes . . . . . 279

### SCIENCE OF MATERIALS AND TECHNOLOGICAL BASICS OF MNST

- Klimov E. A., Pushkarev S. S., Klochkov A. N.** Influence of the Built-in Piezoelectric Field on the Photoluminescence Spectra of Strained Superlattices InGaAs/GaAs on GaAs (110) and (111)A Substrates . . . . . 283
- Filippov I. A., Pronin I. A., Kitaev A. S.** Influence of the Sintering Temperature of Zinc Oxide Powder on the Varistor Properties of Structures Based on It . . . . . 288

### MICRO- AND NANOSYSTEM TECHNIQUE ELEMENTS

- Ryndin E. A., Mavrin I. A., Andreeva N. V., Luchinin V. V.** Neuromorphic Electronic Module, focused on the Use of Memristor ECB, for Image Recognition . . . . . 293
- Zarjankin N. M., Kochurina E. S., Vinogradov A. I., Boev L. R., Anchutina S. A., Timoshenkov A. S., Timoshenkov S. P.** Development and Research of a Micromechanical Rotation Sensor . . . . . 303

- Dayneko A. V., Nikiforov V. G.** Review of the State and Prospects of Development and Application of Domestic Multilayer Piezoactuator for Rocket and Space Technology and Ground space Infrastructure . . . . . 307

- Index** of articles published in the journal "Nano- and Microsystems Technology" in 2022 . . . . . 323

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

# НАНОТЕХНОЛОГИИ И ЗОНДОВАЯ МИКРОСКОПИЯ NANOTECHNOLOGY AND SCANNING PROBE MICROSCOPY

УДК 537.533.35

DOI: 10.17587/nmst.24.271-278

**П. С. Лемешко**, студент, **Ю. М. Спивак**, канд. физ.-мат. наук, доц.,  
**В. А. Мошников**, д-р физ.-мат. наук, проф.

Федеральное государственное автономное учреждение высшего профессионального образования "Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет "ЛЭТИ" им. В. И. Ульянова (Ленина)", e-mail: lemeshkops@yandex.ru, ymkanageeva@yandex.ru

## ВОЗМОЖНОСТИ МУЛЬТИФОТОННОЙ МИКРОСКОПИИ В ИССЛЕДОВАНИЯХ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ НАНОМАТЕРИАЛОВ

Поступила в редакцию 14.04.2022

*Мультифотонная микроскопия (МФМ), широко применяемая в биологии, может быть использована для исследования небиологических структур, в том числе твердотельных полупроводниковых материалов. Возможность проникновения лазерного излучения с длиной волны меньше ширины запрещенной зоны вглубь образца, фокусирование на заданной глубине (например, на наночастицах, инкорпорированных в порах) и анализ оптического отклика обеспечивают решение принципиально новых задач при создании иерархических "умных" наночастиц для целевой доставки лекарств, тераностики и других применений. В работе представлен ответ на наиболее часто задаваемые вопросы по особенностям МФМ. Описаны теоретические основы и практические особенности метода МФМ, продемонстрированы его возможности в исследованиях полупроводниковых материалов на примере образцов пористого кремния и его композиций с серебром. Также были приведены примеры изображений МФМ биологических объектов.*

**Ключевые слова:** мультифотонная микроскопия, флуоресцентная микроскопия, нелинейные оптические эффекты, пористый кремний

### Введение

При создании наноматериалов и приборных структур для микро- и оптоэлектроники исследование локализации и природы центров фотolumинесценции (ФЛ) в объеме материала представляет собой актуальную задачу [1]. Такие исследования возможны с применением методов флуоресцентной микроскопии, например, мультифотонной микроскопии (МФМ).

Методы флуоресцентной микроскопии формируют изображение на основе контраста, возникающего в результате взаимодействия света с веществом. Можно выделить три основные группы методов [2–4]:

*Традиционная микроскопия.* Среди традиционных методов наиболее развитым и распространенным является лазерная конфокальная микроскопия (ЛКМ) [5].

*Микроскопия сверхвысокого разрешения.* Методы микроскопии сверхвысокого разрешения были раз-

работаны, чтобы обойти дифракционный предел — ограничение, основанное на том, что луч с длиной волны  $\lambda$  не может быть сфокусирован в пятно размером меньшим, чем размер дифракционного пятна, описываемый формулой Аббе:  $d = \lambda/2NA$  [6], где  $NA$  — числовая апертура используемого объектива. Наиболее распространенными методами являются: PALM (Photoactivated Localization Microscopy) [7], fPALM (fluorescence PALM) [8], STORM (Stochastic Optical Reconstruction Microscopy) [9], PAINT (Points Accumulation for Imaging in Nanoscale Topography) [10], RESOLFT (REversible Saturable Optical Linear Fluorescence Transitions) [11], STED (STimulated Emission Depletion) [12] и др. Большинство этих методов способно обеспечить разрешение порядка 10 нм или выше.

*Нелинейная оптическая микроскопия.* Принципы методов нелинейной оптической микроскопии построены на явлениях нелинейного взаимодействия света с веществом. Данная группа методов

расширяет возможности классической флуоресцентной микроскопии за счет наблюдения нелинейного отклика вещества. Сюда входит МФМ [13, 14], микроскопия генерации высших гармоник [15], и иные развивающиеся в данный момент методы.

На сегодняшний день флуоресцентная микроскопия наиболее распространена в биологии, и МФМ не исключение. Данный метод применяют для изучения клеточных структур и отдельных молекул, в том числе на основе их автофлуоресценции (собственной флуоресценции) [16–18]; для определения концентрации отдельных веществ в биологическом материале, по которой можно диагностировать заболевание [19–22]; для *in vivo* визуализации [23–25]; исследования химических соединений [26, 27] и др.

Кроме биологии, МФМ находит применение при изучении твердотельных материалов и наноструктур [28–31], которые, в том числе, могут быть использованы в качестве биомаркеров [32, 33]. Так, в указанных выше работах наночастицы серебра и золота использованы для эффективной визуализации пораженных тканей, и в то же время эти частицы под облучением фемтосекундным лазером проявляют терапевтический эффект. Подобная комбинация диагностики и лечения заболеваний называется тераностикой и является современным направлением развития медицины.

### Теоретические основы метода

Взаимодействие электромагнитного излучения с веществом можно представить в виде общего уравнения поляризации  $P$ , наводимой в веществе данным излучением:

$$P(t) = \chi^{(1)}E(t) + \chi^{(2)}E^2(t) + \chi^{(3)}E^3(t) + \chi^{(4)}E^4(t) + \dots, \quad (1)$$

где  $E(t)$  — оптическое электрическое поле;  $\chi(n)$  — нелинейная восприимчивость среды  $n$ -го порядка ( $n = 2, 3, \dots$ ), которая в общем случае является тензорной комплексной величиной. Наибольший вклад в нелинейные процессы будут давать члены низших порядков [34–36].

Двухфотонное поглощение является нелинейным оптическим эффектом третьего порядка. Оно наблюдается при квазиодновременном (на отрезке времени около  $10^{-18}$  с) поглощении двух когерентных фотонов. Переход вещества из основного энергетического состояния в возбужденное происходит за счет того, что один из двух фотонов индуцирует виртуальное энергетическое состояние, благодаря которому два фотона поглощаются одновременно (рис. 1).

Энергия фотонов при двухфотонном поглощении примерно в два раза меньше энергии фотона при однофотонном поглощении, соответственно, необходимая длина волны возбуждающего излучения будет в два раза больше.

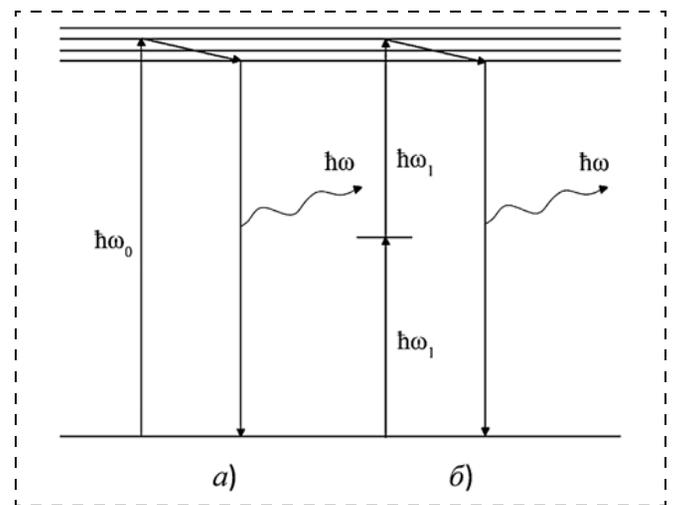


Рис. 1. Энергетическая диаграмма перехода:

$a$  — с участием одного фотона;  $b$  — с участием двух фотонов

Поскольку в процессе участвуют два фотона, то интенсивность ФЛ, обусловленной процессами двухфотонного поглощения, изменяется в зависимости от квадрата интенсивности возбуждающего излучения, поэтому вероятность наблюдения двухфотонного поглощения крайне низка.

Для наблюдения достаточного числа актов двухфотонного поглощения с учетом их очень низкой вероятности необходимо увеличение интенсивности возбуждающего излучения в  $10^6$  раз. Такая мощность излучения достигается путем пространственно-временной фокусировки лазерного луча [37, 38]. Пространственную фокусировку выполняют построением оптической фокусирующей системы. Фокусировку во времени с помощью метода синхронизации мод осуществляет фемтосекундный лазер.

Основа этого метода состоит в генерации в среде лазера электромагнитных волн с определенным соотношением фаз и одинаковой амплитудой. Интерференция между электромагнитными волнами, совпадающими по фазе в определенный момент времени, приводит к тому, что лазерное излучение представляет собой последовательность сверхкоротких мощных импульсов [34]. Длительность высвобождаемых импульсов соответствует нескольким десяткам фемтосекунд, что и определяет фокусировку фотонов во времени.

### Особенности мультифотонной микроскопии

Конструкция мультифотонного микроскопа схематично представлена на рис. 2 [37, 39, 40]. От фемтосекундного инфракрасного лазера излучение по оптическому пути направляется на модулятор интенсивности света (аттенюатор, акусто- или электрооптические устройства). Затем луч проходит через коллимационную систему и попадает на отклоняющие зеркала (гальваностатические или

резонансные), которые задают направление падающего в объектив луча. На оптическом пути перед отклоняющей системой расположено дихроичное зеркало, прозрачное для инфракрасного излучения и отражающее видимый свет. Таким образом, ФЛ, вызванная прошедшим инфракрасным излучением и собранная тем же самым объективом, отражается от дихроичного зеркала и направляется на фотоприемники (фотоэлектронные умножители).

Разрешение мультифотонного микроскопа немного уступает разрешению конфокального микроскопа, что связано с тем, что дифракционный предел для излучения с большей длиной волны оказывается больше. Однако многофотонное возбуждение ФЛ происходит лишь вблизи фокуса [13, 37, 41], а не во всем объеме, как в линейных флуоресцентных методиках, поэтому контрастность изображений МФМ оказывается гораздо выше.

Латеральное и аксиальное разрешения мультифотонного микроскопа существенно различаются. Объемная область возбуждения ФЛ двухфотонным поглощением (воксель) представляет собой вертикально вытянутый эллипсоид. Такая форма связана с изменением плотности фотонов при приближении к фокальной плоскости в процессе фокусировки луча. Так как интенсивность излучения изменяется непрерывно, то в областях выше и ниже фокальной плоскости будет достаточная плотность фотонов для протекания многофотонных процессов. Соотношение радиального пятна возбуждения ФЛ к аксиальному при использовании лучшей оптической системы и объектива с наивысшей числовой апертурой составляет 1:3,7 [42].

Вне оптического фокуса возбуждения ФЛ не происходит.

Протекание процесса двухфотонного поглощения только вблизи фокальной плоскости и использование инфракрасного возбуждающего излучения вместо излучения видимого диапазона обуславливают следующие преимущества мультифотонного микроскопа. Во-первых, вследствие меньшего поглощения и рассеяния света, он проникает гораздо

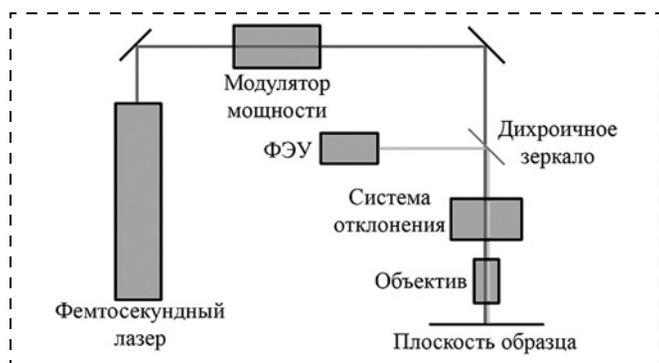


Рис. 2. Схема конструкции мультифотонного микроскопа

глубже в образец, представляющий собой сильно рассеивающие ткани, исследование которых при ЛКМ затруднительно. Во-вторых, в несколько раз уменьшаются эффекты фотоповреждения и фотообесцвечивания живых клеток и тканей, являющиеся существенным ограничением для классической флуоресцентной микроскопии [14].

### Методические разработки СПбГЭТУ "ЛЭТИ"

В ЦКП СПбГЭТУ "ЛЭТИ" расположен мультифотонный микроскоп Bergamo II (ThorLabs, США), оснащенный перестраиваемым фемтосекундным титан-сапфировым лазером, диапазон длин волн излучения которого составляет 720...1060 нм. ФЛ регистрируется с помощью полупроводникового GaAsP фотоумножителя в диапазоне 300...720 нм.

На базе данного микроскопа были проведены исследования структур пористого кремния, композитов на основе пористого кремния и серебра, а также биологических образцов, содержащих в себе люминесцентные наночастицы.

Известно, что пористый кремний способен люминесцировать в оранжевой области видимого диапазона излучения [43], однако информация о ФЛ пористого кремния имеет преимущественно интегральный характер, т. е. известны спектральные характеристики излучения, полученного на большом (относительно размеров поля сканирования оптического микроскопа) участке материала. С помощью МФМ можно получить информацию о локальном распределении ФЛ образца (как по его поверхности, так и по объему).

Ниже приведен пример трехмерного изображения МФМ и изображений срезов образца пористого кремния, полученного электрохимическим травлением монокристаллического кремния *n*-типа с ориентацией поверхности (111) (рис. 3).

Таким образом, МФМ дает возможность исследования характера ФЛ не только по поверхности, но также и ее распределение вглубь образца.

Пример МФМ поверхности композита пористого кремния с серебром представлен на рис. 4, а. Серебро сформировало на поверхности ярко люминесцирующую дендритную сеть, действительная морфология которой представлена на изображении, полученном с помощью атомно-силовой микроскопии (рис. 4, б). Таким образом, можно сделать вывод, что картина ФЛ серебряной сети совпадает с ее действительной структурой.

На рис. 5 представлено изображение среза легкого крысы, чистого и после введения раствора коллоидных квантовых точек AgInS<sub>2</sub>. После введения раствора крыса была выведена из эксперимента через 15 дней. На изображении МФМ видно, что образец, содержащий коллоидные квантовые точки, люминесцирует гораздо ярче, чем чистый образец, при равных условиях сканирования.

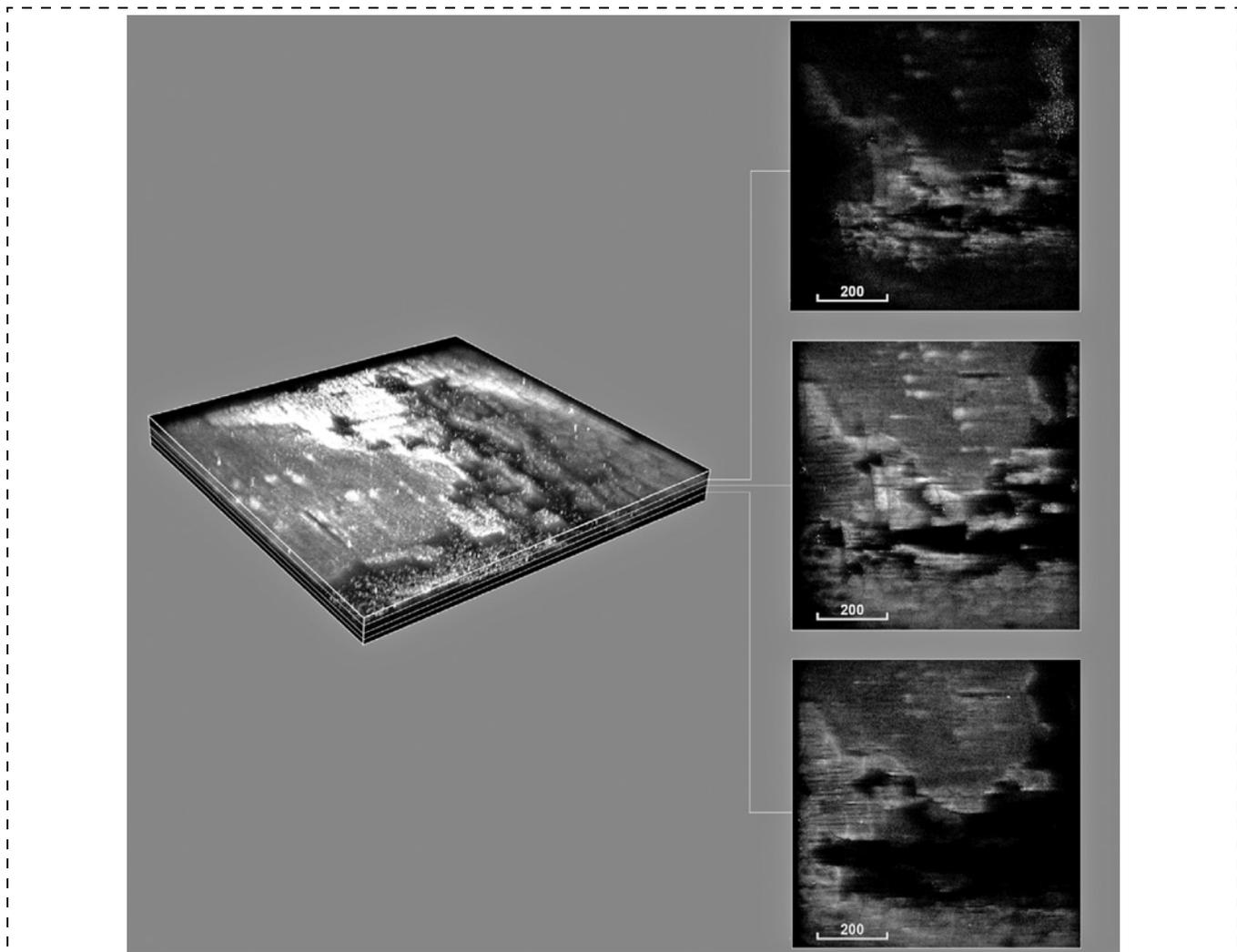


Рис. 3. Трехмерное изображение МФМ пористого кремния и срезы, расположенные по глубине на 19, 35 и 49 мкм от поверхности. Толщина визуализированного слоя 70 мкм. Шкалы представлены в микрометрах

Данный пример показывает, что возможности МФМ совпадают с возможностями ЛКМ в полной мере. На рис. 6 приведен пример изображения поверхности образца почки крысы, который не был приготовлен в качестве тонкого среза толщиной в несколько микрометров, как того в общем случае требуют исследования органов на конфокальном микроскопе. Рассматриваемый образец представляет собой случайным образом отрезанную часть почки, которую также случайным образом расположили на предметном стекле.

Рис. 6 демонстрирует не плоский срез образца, как в случае на рис. 5, а вид сверху на трехмерный объект, которым является исследуемый образец. Такое изображение может быть получено путем сканирования образца по объему

и является более информативным, чем изображение плоских срезов. ЛКМ, использующая возбуждающее излучение видимого диапазона, не может обеспечить такое качество трехмерных изображе-

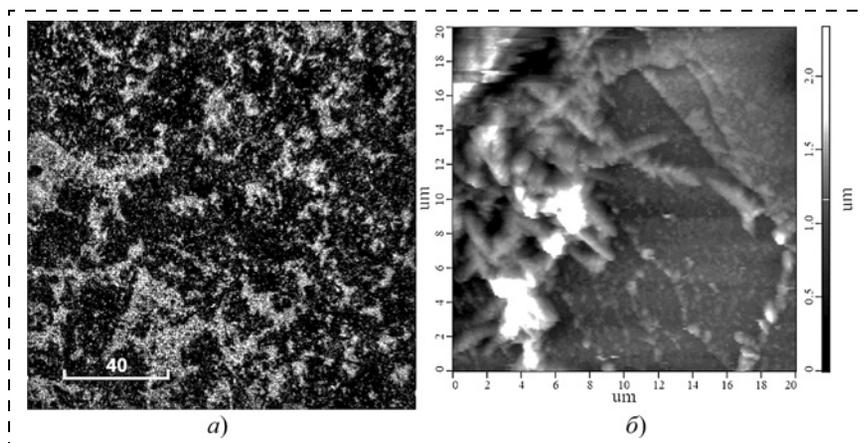
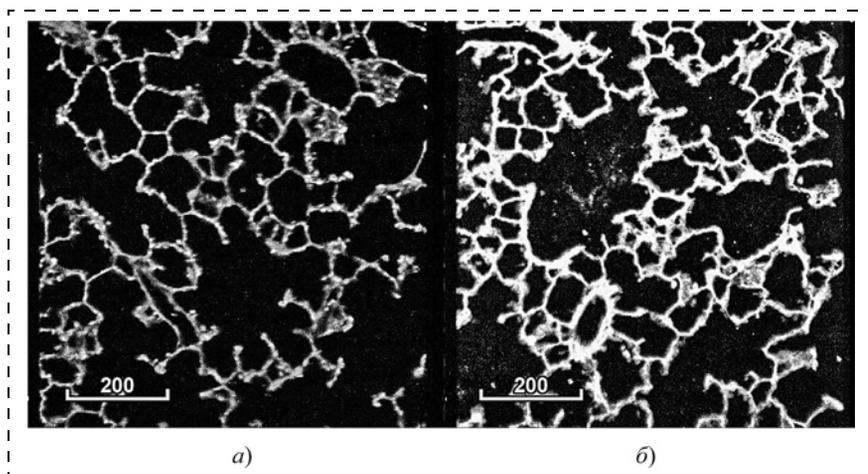


Рис. 4. Изображение МФМ (а) и атомно-силовой микроскопии поверхности композита пористого кремния с серебром (б). Размерная шкала в микрометрах



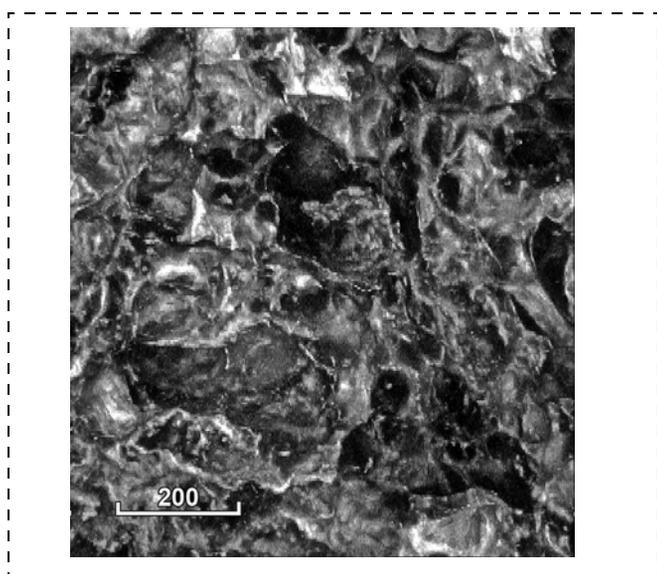
**Рис. 5. Изображение МФМ легких крысы:**

*a* — без введения препарата с квантовыми точками  $\text{AgInS}_2$ ; *b* — с введенным препаратом малой концентрации по прошествии 15 дней. Размерная шкала указана в микрометрах

ний потому, что видимый свет достаточно сильно поглощается биологической средой.

На рис. 6 изображена структура почки крысы с интернированными наночастицами пористого кремния.

Принцип построения изображения МФМ состоит в следующем. Луч света, сфокусированный системой микроскопа в определенную точку, вызывает ФЛ из этой области, которая собирается объективом и передается на фотоэлектронный умножитель. Данные о яркости излучения фиксируются и присваиваются определенному пикселю на изображении, которое после сканирования выводится на экран компьютера. Таким образом, изображение строится попиксельно.



**Рис. 6. Изображение МФМ почки крысы, интернированной наночастицами пористого кремния. Размерная шкала в микрометрах**

Из этого следует, что динамические процессы, протекающие во время облучения образца в данной области, связанные с преломлением, отражением и рассеянием эмиссионного излучения, не будут фиксироваться на изображении, так как излучение, вышедшее из любой области образца вне фокуса и собранное объективом, будет учтено в качестве яркости только одного данного пикселя.

## Заключение

Основной областью применения МФМ является исследование биологических образцов. Однако метод применим также для исследования твердотельных материала-

лов, обладающих свойством ФЛ, обусловленным как энергетической структурой материала, так и наличием дефектов в образце.

МФМ позволяет получить информацию о локальном распределении ФЛ как по поверхности образца, так и по его объему, и не позволяет наблюдать динамические оптические эффекты, так как способ выхода эмиссионного излучения из объема образца не регистрируется данным методом.

Сравнивая между собой методы ЛКМ и МФМ, можно выделить несколько преимуществ последнего. Несмотря на то, что разрешение мультифотонного микроскопа уступает разрешению конфокального микроскопа, контраст изображения МФМ оказывается выше. Также ключевыми преимуществами мультифотонного микроскопа являются возможность исследования образцов по глубине и построения трехмерных изображений, а также меньшее фотоповреждение и фотообесцвечивание биологических образцов в сравнении с ЛКМ.

В исследованиях твердотельных материалов МФМ позволяет изучать локальное распределение центров ФЛ и по глубине. На примере пористого кремния и пористого кремния, инкорпорированного серебром, выявлены особенности распределения различных по природе центров ФЛ во взаимосвязи с морфологией пористого материала.

*Авторы выражают благодарность А. Ю. Гагариной за предоставление образцов пористого кремния, аспиранту М. С. Истоминой и д-ру хим. наук Д. В. Королеву (НМИЦ им. В. А. Алмазова) за предоставление образцов аутопсии органов крыс с интернированными коллоидными квантовыми точками. Также авторы выражают благодарность аспиранту О. А. Корепанову за предоставление результатов измерений методом атомно-силовой микроскопии.*

## Список литературы

1. **Александрова О. А., Максимов А. И., Мараева Е. В.** Синтез и самоорганизация квантовых точек сульфида свинца для люминесцентных структур, полученных методом испарения коллоидного раствора // *Нано- и микросистемная техника*. 2013. № 2. С. 19–23.
2. **Александрова О. А., Галиева Д. М., Дробинцева А. О., Кветной И. М., Крылова Ю. С., Мазинг Д. С., Матюшкин Л. Б., Мошников В. А., Мусихин С. Ф., Полякова В. О., Рыжов О. А., Щеглова А. А.** Наночастицы, наносистемы и их применение. Ч. 1. Коллоидные квантовые точки // *Уфа: Аэтерна*, 2015. С. 236.
3. **Ведяйкин А. Д., Ходорковский М. А., Вишняков И. Е.** Методы флуоресцентной микроскопии сверхвысокого разрешения и их использование для визуализации различных клеточных структур // *Цитология*. 2019. № 5. С. 343–356.
4. **Klementieva N. V., Zagaynova E. V., Lukyanov K. A., Mishin A. S.** The Principles of Super-Resolution Fluorescence Microscopy (Review) // *Современные технологии в медицине*. 2016. N. 8. С. 130–140.
5. **Nwaneshiudu A., Kuschal C., Sakamoto F. H., Rox A. R., Schwarzenberger K., Young R. C.** Introduction to confocal microscopy // *Journal of Investigative Dermatology*. 2012. Vol. 132, N. 12. P. 1–5.
6. **Schermelleh L., Heintzmann R., Leonhardt H.** A guide to super-resolution fluorescence microscopy // *Journal of Cellular Biology*. 2010. N. 190. P. 165–175.
7. **Betzig E., Patterson G. H., Sougrat R., Lindwasser O. W., Olenych S., Bonifacino J. S., Davidson M. W., Lippincott-Schwartz J., Hess H. F.** Imaging intracellular fluorescent proteins at nanometer resolution // *Science*. 2006. N. 313. P. 1642–1645.
8. **Hess S. T., Girirajan T. P., Mason M. D.** Ultra-high resolution imaging by fluorescence photoactivation localization microscopy // *Biophysics*. 2006. N. 91. P. 4258–4272.
9. **Rust M. J., Bates M., Zhuang X.** Sub-diffraction-limit imaging by stochastic optical reconstruction microscopy (STORM) // *Nature Methods*. 2006. N. 3. P. 793–795.
10. **Schnitzbauer J., Strauss M. T., Schlichthaerle T., Schueder F., Jungmann R.** Super-resolution microscopy with DNA-PAINT // *Nature Protocols*. 2017. N. 12. P. 1198–1228.
11. **Kwon J., Hwang J., Park J., Han G. R., Han K. Y., Kim S. K.** RESOLFT nanoscopy with photoswitchable organic fluorophores // *Science Reports*. 2015. N. 5. P. 17804.
12. **Klar T. A., Hell S. W.** Subdiffraction resolution in far-field fluorescence microscopy // *Optics letters*. 1999. N. 24. P. 954–956.
13. **Masters B. R., So P. T. C.** Antecedents of Two-Photon Excitation Laser Scanning Microscopy // *Microscopy Research and Technique*. 2004. N. 63. P. 3–11.
14. **Denk W., Strickler J. R., Webb W. W.** Two-Photon Laser Scanning Fluorescence Microscopy // *Science*. 1990. Vol. 248. P. 73–76.
15. **Sheppard C., Gannaway J., Kompfner R., Walsh D.** The scanning harmonic optical microscope // *IEEE Journal of Quantum Electronics*. 1977. Vol. 13. N. 9. P. 912–912.
16. **Yu Q., Heikal A. A.** Two-photon autofluorescence dynamics imaging reveals sensitivity of intracellular NADH concentration and conformation to cell physiology at the single-cell level // *Journal of Photochemistry and Photobiology B: Biology*. 2009. Vol. 95. P. 46–57.
17. **Yong W. J., Hye R. K., Ye J. R., Mingchong D., Kyo H. A.** Addressing the autofluorescence issue in deep tissue imaging by two-photon microscopy: the significance of far-red emitting dyes // *Chemical Science*. 2017. N. 8. P. 7696–7704.
18. **Wei Z., Dong L., Yan Z., Yi L., Jianan Y. Q.** Two-photon excited hemoglobin fluorescence // *Biomedical Optics Express*. 2011. N. 2. P. 71–79.
19. **Jiao X., Li Y., Niu J., Xie X., Wang X., Tang B.** Small-Molecule Fluorescent Probes for Imaging and Detection of Reactive Oxygen, Nitrogen, and Sulfur Species in Biological Systems // *Analytical Chemistry*. 2018. N. 90. P. 533–555.
20. **Zhiqiang M., Hong J., Zhen L., Cheng Z., Wei Z., Zhihong L.** An N-nitrosation reactivity-based two-photon fluorescent probe for the specific in situ detection of nitric oxide // *Chemical Science*. 2017. N. 8. P. 4533–4538.
21. **Simonsson C.** New insights in contact allergy and drug delivery. A study of formulation effects and hapten targets in skin using two-photon fluorescence microscopy // *Doctoral Thesis University of Gothenburg. Faculty of Science Department of Chemistry*. 2011.
22. **Sumalekshmy S., Fahrni Christoph J.** Metal-Ion-Responsive Fluorescent Probes for Two-Photon Excitation Microscopy // *Chemistry of Materials*. 2011. N. 23. P. 483–500.
23. **Bar-Noam A., Farah N., Shoham S.** Correction-free remotely scanned two-photon in vivo mouse retinal imaging // *Light: Science and Applications*. 2016. N. 5.
24. **Schiefl I. M., Castrop H.** Deep insights: intravital imaging with two-photon microscopy // *Pflugers Archiv European Journal of Physiology*. 2016. N. 468. P. 1505–1516.
25. **Gao Y., Feng G., Jiang T., Goh C., Ng L., Liu B., Li B., Yang L., Hua J., Tian H.** Biocompatible Nanoparticles Based on Diketo-Pyrrolo-Pyrrole (DPP) with Aggregation-Induced Red/NIR Emission for In Vivo Two-Photon Fluorescence Imaging // *Advanced Functional Materials*. 2015. N. 25. P. 2857–2866.
26. **Schwendt T., Michalik C., Zavrel M., Dennig A., Spiess A. C., Poprawe R., Janzen C.** Determination of Temporal and Spatial Concentration Gradients in Hydrogel Beads Using Multiphoton Microscopy Techniques // *Applied Spectroscopy*. 2010. N. 64. P. 720–726.
27. **Dal Fovo A., Sanz M., Oujia M., Fontana R., Mattana S., Cicchi R., Targowski P., Sylwestrzak M., Romani A., Grazia C., Filippidis G., Psilodimitrakopoulos S., Lemonis A., Castillejo M.** In-Depth Analysis of Egg-Tempera Paint Layers by Multiphoton Excitation Fluorescence Microscopy // *Sustainability*. 2020. N. 12. P. 3831.
28. **Jing-Liang L., Min G.** Surface plasmonic gold nanorods for enhanced two-photon microscopic imaging and apoptosis induction of cancer cells // *Biomaterials*. 2010. Vol. 31. P. 9492–9498.
29. **Olesiak-Banska J., Waszkielewicz M., Obstarczyka P., Samoc M.** Two-photon absorption and photoluminescence of colloidal gold nanoparticles and nanostructures // *Chemical Society Reviews*. 2019. N. 48. P. 4087–4117.
30. **Viarbitskaya S., Teulle A., Cuche A., Sharma J., Girard C., Dujardin E., Arbouet A.** Morphology-induced redistribution of surface plasmon modes in two-dimensional crystalline gold platelets // *Applied Physics Letters*. 2013. N. 103. P. 131112.
31. **Madzharova F., Nodar A., Živanović V., Huang M. R. S., Koch C. T., Esteban R., Aizpurua J., Kneipp J.** Gold- and Silver-Coated Barium Titanate Nanocomposites as Probes for Two-Photon Multimodal Microspectroscopy // *Advanced Functional Materials*. 2019. N. 29. 1904289.
32. **Croissant J. G., Zink J. I., Raehm L., Durand J.-O.** Two-Photon-Excited Silica and Organosilica Nanoparticles for Spatiotemporal Cancer Treatment // *Advanced Healthcare Materials*. 2018. N. 7. 1701248.
33. **Hong W., Jing W., Chonghua Z., Yuan Z., Yubin Z., Lin L., Changmin Y., Peisheng Z., Jian C.** Red carbon dots as label-free two-photon fluorescent nanoprobe for imaging of formaldehyde in living cells and zebrafishes // *Chinese Chemical Letters*. 2020. Vol. 31. P. 759–763.
34. **Беспровзанных В. Г., Первадчук В. П.** Нелинейная оптика: учеб. пособие. Пермь: Издательство ПГТУ, 2011. 200 с.
35. **Byer R. L.** Nonlinear Optical Phenomena and Materials // *Annual Review of Materials Science*. 1974. Vol. 4.
36. **Крылова Ю. С., Дробинцева А. О., Полякова В. О., Кветной И. М., Пантелеев Л. Н., Мусихин С. Ф., Барзда В.** Нелинейная оптическая микроскопия в применении к биомедицинским исследованиям // *Биотехносфера*. 2015. № 2. С. 2–7.

37. Sanderson M. J., Smith I., Parker I., Bootman M. D. Fluorescence Microscopy // Cold Spring Harbor Protocols. 2014. P. 1042–1065.

38. Wang B.-G., König K., Halbhauer, K.-J. Two-photon microscopy of deep intravital tissues and its merits in clinical research // Journal of Microscopy. 2010. N. 238. P. 1–20.

39. Yoko M. Advances in Two-Photon Imaging in Plants // Plant and Cell Physiology. 2021. N. 62. P. 1224–1230.

40. Zipfel W., Williams R., Webb W. Nonlinear magic: multiphoton microscopy in the biosciences // Nature Biotechnology. 2003. N. 21. P. 1369–1377.

41. Helmchen F., Denk W. Deep tissue two-photon microscopy // Nature Methods. 2005. N. 2. P. 932–940.

42. Pawlicki M., Collins H. A., Denning R. G., Anderson H. L. Two-Photon Absorption and the Design of Two-Photon Dyes // Angewandte Chemie International Edition. 2009. N. 48. P. 3244–3266.

43. Belorus A. O., Spivak Y. M., Pastukhov A. I., Moshnikov V. A., Koshevoi V. L. Study of Luminescent and Morphological Properties of Porous Silicon Matrix Obtained by Photoelectrochemical Etching // IEEE Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering. 2019. P. 765–767.

**P. S. Lemeshko**, student, lemeshkops@yandex.ru, **Yu. M. Spivak**, Ph. D. (Phys.-Math.), Associate Professor, ymkanageeva@yandex.ru, **V. A. Moshnikov**, Dr. Sci. (Phys.-Math.), Prof, Saint Petersburg Electrotechnical University "LETI", Saint Petersburg, 197376, Russian Federation

*Corresponding author:*

**Polina S. Lemeshko**, Student, Saint Petersburg Electrotechnical University "LETI", Saint Petersburg, 197376, Russian Federation

E-mail: lemeshkops@yandex.ru

## Possibilities of Multiphoton Microscopy in Semiconductor Nanomaterials Research

Received on April 14, 2022

Accepted on June 6, 2022

*Multiphoton microscopy is the method using nonlinear optical effect which is two-photon absorption. It occurs when two identical photons are absorbed simultaneously. The photon energy should be around two times smaller than the photon energy for one-photon absorption. Thus, the excitation irradiation wavelength for multiphoton microscopy should be twice that for conventional confocal microscopy.*

*Nowadays, multiphoton microscopy is widely used for biological research, but it is possible to apply this for non-biological materials studying, particularly, for solid-state materials and structures. Low-wavelength laser irradiation deep penetration, focusing and optical signal analysis possibility provides essential new challenges solving of hierarchical "smart" nanoparticles synthesis for target drug delivery, theranostics etc. In this paper we give an answer of some most popular questions about multiphoton microscopy. Nature and aspects of the multiphoton microscopy method were described. Advantages of this method in comparison with confocal microscopy method were shown. Multiphoton microscopy gives the best image contrast and the less photodamage and photobleaching of biological samples, and provides an opportunity of three-dimensional imaging of the biomaterials as well as the solid-state materials. Additionally, capabilities of this method for solid-state materials research were demonstrated by the porous silicon samples example. Also, multiphoton microscopy images of biological objects were shown.*

**Keywords:** multiphoton microscopy, fluorescent microscopy, nonlinear optical effects, porous silicon

*For citation:*

**Lemeshko P. S., Spivak Yu. M., Moshnikov V. A.** Possibilities of Multiphoton Microscopy in Semiconductor Nanomaterials Research, *Nano- i Mikrosistemnaya Tekhnika*, 2022, vol. 24, no. 6, pp. 271–278.

DOI: 10.17587/nmst.24.271-278

### References

1. Aleksandrova O. A., Maksimov A. I., Maraeva E. V. Sintez i samoorganizaciya kvantovyh toček sul'fida svinca dlya lyuminescentnyh struktur, poluchennyh metodom ispareniya kolloidnogo rastvora, *Nano- i mikrosistemnaya tekhnika*, 2013, no. 2, pp. 19–23 (in Russian).

2. Aleksandrova O. A., Galieva D. M., Drobincheva A. O., Kvetnoy I. M., Krylova Yu. S., Mazing D. S., Matyushkin L. B., Moshnikov V. A., Musihin S. F., Polyakova V. O., Ryzhov O. A., Shcheglova A. A. *Nanochasticy, nanosistemy i ih primeneniye. CH. 1. Kolloidnye kvantovye točki*, Ufa, Aeterna, 2015, 236 p. (in Russian).

3. Vedyajkin A. D., Hodorkovskij M. A., Vishnyakov I. E. Metody fluorescentnoj mikroskopii sverhvyssokogo razresheniya i ih ispol'zovanie dlya vizualizacii razlichnyh kletochnyh struktur, *Citologiya*, 2019, no. 5, pp. 343–356 (in Russian).

4. Klementieva N. V., Zagaynova E. V., Lukyanov K. A., Mishin A. S. The Principles of Super-Resolution Fluorescence Microscopy (Review), *Sovremennye tehnologii v medicine*, 2016, no. 8, pp. 130–140.

5. Nwaneshiudu A., Kuschal C., Sakamoto F. H., Rox A. R., Schwarzenberger K., Young R. C. Introduction to confocal microscopy, *Journal of Investigative Dermatology*, 2012, vol. 132, no. 12, pp. 1–5.

6. Schermelleh L., Heintzmann R., Leonhardt H. A guide to super-resolution fluorescence microscopy, *Journal of Cellular Biology*, 2010, no. 190, pp. 165–175.
7. Betzig E., Patterson G. H., Sougrat R., Lindwasser O. W., Olenych S., Bonifacino J. S., Davidson M. W., Lippincott-Schwartz J., Hess H. F. Imaging intracellular fluorescent proteins at nanometer resolution, *Science*, 2006, no. 313, pp. 1642–1645.
8. Hess S. T., Girirajan T. P., Mason M. D. Ultra-high resolution imaging by fluorescence photoactivation localization microscopy, *Biophysics*, 2006, no. 91, pp. 4258–4272.
9. Rust M. J., Bates M., Zhuang X. Sub-diffraction-limit imaging by stochastic optical reconstruction microscopy (STORM), *Nature Methods*, 2006, no. 3, pp. 793–795.
10. Schnitzbauer J., Strauss M. T., Schlichthaerle T., Schueder F., Jungmann R. Super-resolution microscopy with DNA-PAINT, *Nature Protocols*, 2017, no. 12, pp. 1198–1228.
11. Kwon J., Hwang J., Park J., Han G. R., Han K. Y., Kim S. K. RESOLFT nanoscopy with photoswitchable organic fluorophores, *Science Reports*, 2015, no. 5, p. 17804.
12. Klar T. A., Hell S. W. Subdiffraction resolution in far-field fluorescence microscopy, *Optics letters*, 1999, no. 24, pp. 954–956.
13. Barry R. Masters, Peter T. C. So. Antecedents of Two-Photon Excitation Laser Scanning Microscopy, *Microscopy Research and Technique*, 2004, no. 63, pp. 3–11.
14. Denk W., Strickler J. R., Webb W. W. Two-Photon Laser Scanning Fluorescence Microscopy, *Science*, 1990, vol. 248, pp. 73–76.
15. Sheppard C., Gannaway J., Kompfner R., Walsh D. The scanning harmonic optical microscope, *IEEE Journal of Quantum Electronics*, 1977, vol. 13, no. 9, pp. 912–912.
16. Yu Q., Heikal A. A. Two-photon autofluorescence dynamics imaging reveals sensitivity of intracellular NADH concentration and conformation to cell physiology at the single-cell level, *Journal of Photochemistry and Photobiology B: Biology*, 2009, vol. 95, pp. 46–57.
17. Yong W. J., Hye R. K., Ye J. R., Mingchong D., Kyo H. A. Addressing the autofluorescence issue in deep tissue imaging by two-photon microscopy: the significance of far-red emitting dyes, *Chemical Science*, 2017, no. 8, pp. 7696–7704.
18. Wei Z., Dong L., Yan Z., Yi L., Jianan Y. Q. Two-photon excited hemoglobin fluorescence, *Biomedical Optics Express*, 2011, no. 2, pp. 71–79.
19. Jiao X., Li Y., Niu J., Xie X., Wang X., Tang B. Small-Molecule Fluorescent Probes for Imaging and Detection of Reactive Oxygen, Nitrogen, and Sulfur Species in Biological Systems, *Analytical Chemistry*, 2018, no. 90, pp. 533–555.
20. Zhiqiang M., Hong J., Zhen L., Cheng Z., Wei Z., Zhihong L. An N-nitrosation reactivity-based two-photon fluorescent probe for the specific in situ detection of nitric oxide, *Chemical Science*, 2017, no. 8, pp. 4533–4538.
21. Simonsson C. *New insights in contact allergy and hapten drug delivery. A study of formulation effects and hapten targets in skin using two-photon fluorescence microscopy*, Doctoral Thesis University of Gothenburg, Faculty of Science Department of Chemistry, 2011.
22. Sumalekshmy S., Fahrni Christoph J. Metal-Ion-Responsive Fluorescent Probes for Two-Photon Excitation Microscopy, *Chemistry of Materials*, 2011, no. 23, pp. 483–500.
23. Bar-Noam A., Farah N., Shoham S. Correction-free remotely scanned two-photon in vivo mouse retinal imaging, *Light: Science and Applications*, 2016, no. 5.
24. Schiebl I. M., Castrop H. Deep insights: intravital imaging with two-photon microscopy, *Pflugers Archiv European Journal of Physiology*, 2016, no. 468, pp. 1505–1516.
25. Gao Y., Feng G., Jiang T., Goh C., Ng L., Liu B., Li B., Yang L., Hua J., Tian H. Biocompatible Nanoparticles Based on Diketo-Pyrrolo-Pyrrole (DPP) with Aggregation-Induced Red/NIR Emission for In Vivo Two-Photon Fluorescence Imaging, *Advanced Functional Materials*, 2015, no. 25, pp. 2857–2866.
26. Schwendt T., Michalik C., Zavrel M., Dennig A., Spiess A. C., Poprawe R., Janzen C. Determination of Temporal and Spatial Concentration Gradients in Hydrogel Beads Using Multiphoton Microscopy Techniques, *Applied Spectroscopy*, 2010, no. 64, pp. 720–726.
27. Dal Fovo A., Sanz M., Oujja M., Fontana R., Mattana S., Cicchi R., Targowski P., Sylwestrzak M., Romani A., Grazia C., Filippidis G., Psilodimitrakopoulos S., Lemonis A., Castillejo M. In-Depth Analysis of Egg-Tempera Paint Layers by Multiphoton Excitation Fluorescence Microscopy, *Sustainability*, 2020, no. 12, pp. 3831.
28. Jing-Liang L., Min G. Surface plasmonic gold nanorods for enhanced two-photon microscopic imaging and apoptosis induction of cancer cells, *Biomaterials*, 2010, vol. 31, pp. 9492–9498.
29. Olesiak-Banska J., Waszkielewicz M., Obstarczyka P., Samoc M. Two-photon absorption and photoluminescence of colloidal gold nanoparticles and nanoclusters, *Chemical Society Reviews*, 2019, no. 48, pp. 4087–4117.
30. Viarbitskaya S., Teulle A., Cuche A., Sharma J., Girard C., Dujardin E., Arbouet A. Morphology-induced redistribution of surface plasmon modes in two-dimensional crystalline gold platelets, *Applied Physics Letters*, 2013, no. 103, pp. 131112.
31. Madzharova F., Nodar A., Živanović V., Huang M. R. S., Koch C. T., Esteban R., Aizpurua J., Kneipp J. Gold- and Silver-Coated Barium Titanate Nanocomposites as Probes for Two-Photon Multimodal Microspectroscopy, *Advanced Functional Materials*, 2019, no. 29, 1904289.
32. Croissant J. G., Zink J. I., Raehm L., Durand J.-O. Two-Photon-Excited Silica and Organosilica Nanoparticles for Spatiotemporal Cancer Treatment, *Advanced Healthcare Materials*, 2018, no. 7, 1701248.
33. Hong W., Jing W., Chonghua Z., Yuan Z., Yubin Z., Lin L., Changmin Y., Peisheng Z., Jian C. Red carbon dots as label-free two-photon fluorescent nanoprobe for imaging of formaldehyde in living cells and zebrafishes, *Chinese Chemical Letters*, 2020, vol. 31, pp. 759–763.
34. Besprozvannyh V. G., Pervadchuk V. P. *Nelinejnaya optika: ucheb. posobie (Nonlinear optics: study letter)*, Perm', Izdatel'stvo PGTU, 2011, p. 200 (in Russian).
35. Byer R. L. Nonlinear Optical Phenomena and Materials, *Annual Review of Materials Science*, 1974, vol. 4.
36. Krylova Yu. S., Drobinceva A. O., Polyakova V. O., Kvetnoj I. M., Panteleev L. N., Musihin S. F., Barzda V. Nelinejnaya opticheskaya mikroskopiya v primenenii k biomedicinskim issledovaniyam (Nonlinear optical microscopy applied in biological research), *Biotehnosfera*, 2015, no. 2, pp. 2–7 (in Russian).
37. Sanderson M. J., Smith I., Parker I., Bootman M. D. Fluorescence Microscopy, *Cold Spring Harbor Protocols*, 2014, pp. 1042–1065.
38. Wang B.-G., König K., Halbhuber, K.-J. Two-photon microscopy of deep intravital tissues and its merits in clinical research, *Journal of Microscopy*, 2010, no. 238, pp. 1–20.
39. Yoko M. Advances in Two-Photon Imaging in Plants, *Plant and Cell Physiology*, 2021, no. 62, pp. 1224–1230.
40. Zipfel W., Williams R., Webb W. Nonlinear magic: multiphoton microscopy in the biosciences, *Nature Biotechnology*, 2003, no. 21, pp. 1369–1377.
41. Helmchen F., Denk W. Deep tissue two-photon microscopy, *Nature Methods*, 2005, no. 2, pp. 932–940.
42. Pawlicki M., Collins H. A., Denning R. G., Anderson H. L. Two-Photon Absorption and the Design of Two-Photon Dyes, *Angewandte Chemie International Edition*, 2009, no. 48, pp. 3244–3266.
43. Belorus A. O., Spivak Y. M., Pastukhov A. I., Moshnikov V. A., Koshevoi V. L. Study of Luminescent and Morphological Properties of Porous Silicon Matrix Obtained by Photoelectrochemical Etching, *IEEE Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering*, 2019, pp. 765–767.

**С. С. Шапошников**, аспирант, sergey.shaposhnikov@phystech.edu  
Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет),  
г. Долгопрудный, Московская обл.

## ИССЛЕДОВАНИЕ АВТОЭМИССИОННЫХ СВОЙСТВ МНОГОЭМИТТЕРНЫХ КАТОДОВ ИЗ УГЛЕРОДНЫХ НАНОТРУБОК

*Поступила в редакцию 07.06.2022*

*В настоящее время учеными активно изучаются свойства катодов на основе разных углеродных материалов, в том числе углеродных нанотрубок. Цель данной работы — исследовать возможность использования многоэмиттерных катодов из углеродных нанотрубок для разработки автокатодов. Были изучены автоэмиссионные свойства многоэмиттерных катодов на основе нитей из многостенных углеродных нанотрубок. Для проведения экспериментов была собрана конструкция из нескольких катодов, размещенных на общем основании. В итоге подтвердилась гипотеза об аддитивности токов отдельных эмиттеров, а также был получен эмиссионный ток при низком напряжении.*

**Ключевые слова:** автоэлектронная эмиссия, автоэмиссионные катоды, углеродные автокатоды, многоэмиттерные катоды, углеродные нанотрубки

### Введение

Автокатоды имеют широкий спектр применения — от специфических вакуумных приборов до энергоэффективных источников света различного назначения, благодаря уникальному сочетанию следующих эмиссионных и термических свойств: отсутствие нагреваемых деталей; высокая плотность тока; стойкость тока к внешним воздействиям температуры и излучения; высокая крутизна вольт-амперных характеристик; экологичность.

В настоящее время активно изучаются свойства катодов на основе углеродных материалов, в том числе углеродных нанотрубок (УНТ).

Большие надежды возлагаются на катоды из этих материалов. Однако до сих пор требования к стабильности эмиссионного тока и однородности автоэмиссионного изображения препятствовали созданию и широкому использованию устройств на их основе.

Цель данного исследования — установить возможность использования многоэмиттерных катодов из углеродных нанотрубок для разработки новых эффективных автокатодов, обеспечивающих высокую плотность тока и хорошее стабильное время работы.

### Материалы и методы

Сейчас активно изучают автоэмиссионные свойства различных материалов. Перспективным материалом для создания катодов нового поколения являются углеродные нанотрубки, обладающие уникальными физико-химическими характеристиками. Сочетание миниатюрных размеров, высо-

кой механической, термической и химической стабильности, хорошей электропроводности делают нанотрубки весьма привлекательным объектом для исследований и поиска наиболее эффективных способов их использования [1–4]. Идеальная углеродная нанотрубка представляет собой протяженную цилиндрическую структуру диаметром от одного до нескольких десятков нанометров и длиной несколько микрометров, состоящую из одной или нескольких свернутых в трубку графитовых плоскостей (поверхностей, выложенных правильными шестиугольниками, на вершинах которых расположены атомы углерода) и обычно заканчивается полусферической головкой, которую можно рассматривать как половину молекулы фуллерена. Но в отличие от фуллеренов, представляющих собой молекулярную модификацию углерода, нанотрубки рассматривают как промежуточное состояние вещества, сочетающее в себе качества как молекулярного объекта, так и конденсированной фазы.

Многостенные нанотрубки отличаются от одностенных гораздо большим разнообразием форм и конфигураций. Разнообразие структур проявляется как в продольном, так и в поперечном направлениях. Обычно используют такие конструкции, как "русская матрешка" (набор коаксиально вложенных цилиндрических трубок или коаксиальных призм), и конструкция, напоминающая свиток. Все структуры характеризуются расстоянием между соседними слоями графена, близким к 0,34 нм, что соответствует расстоянию между соседними плоскостями кристаллического графита [5].

Массив углеродных нанотрубок обычно состоит из огромного числа отдельных нанотрубок. Они отличаются друг от друга своей геометрией, степенью выравнивания и электронными свойствами. Вследствие резкого характера зависимости эмиссионного тока отдельной нанотрубки от напряженности электрического поля в окрестности ее острия, основной вклад в эмиссию обычно дает лишь небольшое число нанотрубок, для которых значение усиления электрического поля максимальное. Обычно это самые высокие нанотрубки массива. С ростом приложенного напряжения увеличивается относительный вклад в эмиссию остальных нанотрубок. Кроме того, электрическое поле вблизи отдельной нанотрубки, входящей в состав массива, может существенно искажаться ввиду экранирующего эффекта окружающих соседей по массиву. В результате такого воздействия усиление электрического поля нанотрубки может зависеть не только от ее аспектного отношения и межэлектродного расстояния, но и от геометрии и плотности нанотрубок в массиве. Исследования показывают, что максимальная плотность тока эмиссии достигается при среднем расстоянии между нанотрубками, равном порядку высоты отдельных нанотрубок, составляющих массив [6].

Приблизительно оценить максимальную плотность тока автоэмиссии с катода на основе углеродных нанотрубок можно из следующих соображений. Допустимая плотность нанотрубок на подложке ограничена эффектами экранирования, поэтому расстояние между УНТ в массиве примерно равно высоте нанотрубки. Например, для массива УНТ высотой 1 мкм оптимальная плотность эмиттера составляет около  $10^7 \text{ см}^{-2}$ . Максимально достижимый ток эмиссии индивидуальной углеродной нанотрубки ограничен тепловыми эффектами и составляет около 1 мкА. Поэтому максимально достижимая плотность тока эмиссии полевого катода на основе нанотрубок должна составлять  $100 \text{ А/см}^{-2}$  [6].

На практике такие высокие значения плотности тока эмиссии не могут быть получены в стационарных условиях для катодов большой площади. Основными причинами этого противоречия являются нарушение равномерного характера распределения нанотрубок по поверхности катода, а также малая степень вертикальной ориентации нанотрубок. Благодаря этим факторам основной вклад в суммарный ток эмиссии вносят лишь те немногие нанотрубки, которые выступают на фоне массива и имеют максимальное значение коэффициента усиления электрического поля [6].

Кроме того, в плотном массиве нанотрубок затруднен отвод теплоты, поэтому тепловое ограничение тока эмиссии происходит при гораздо меньших токах, чем в случае отдельных изолированных нанотрубок. Отсюда следует, что максимально до-

стижимое значение плотности тока эмиссии может быть достигнуто только в результате тщательной подготовки катода с высокой степенью однородности поверхности и вертикальной ориентации нанотрубок. В связи с этим максимальное значение плотности тока эмиссии, полученное во многих работах, составляет около  $1 \text{ А/см}^{-2}$ , и оно заметно уступает результатам, оцененным выше [7].

Одним из первых применений автоэмиссионных катодов на основе углеродных нанотрубок может стать создание осветительных ламп. В этих устройствах эмитированные катодом и ускоренные в межэлектронном промежутке электроны падают на люминофор, где их энергия преобразуется в свет. Обычно в таких устройствах источниками излучения служат термоэмиссионные катоды, но они требуют нагрева катода до нескольких сотен градусов Цельсия, что увеличивает энергозатраты и усложняет конструкцию. Использование автокатодов на основе нанотрубок поможет преодолеть эти недостатки [8].

Актуальным и простым способом изготовления нитей из углеродных нанотрубок является диспергирование углеродных нанотрубок в жидкой среде с последующим ее удалением. В качестве жидкой среды используется хлорсодержащий органический растворитель. Жидкую среду удаляют в осадочной ванне, после чего сушат сформированное волокно.

Для испытаний автоэмиссионных катодов использовался вакуумный стенд с давлением остаточных газов  $10^{-6}$  мм рт. ст. на базе узлов от технологий Agilent и Vacom Vacuum. В электрическую схему этого стенда входят высоковольтные источники питания и осциллографы.

Поскольку для устройств с автокатадами на основе углеродных нанотрубок требуется вакуум всего  $\sim 10^{-5} - 10^{-7}$  мм рт. ст., то за основу конструкции была взята система крепления ISO Clamp. В основе вакуумных камер лежат трубопроводы с эффективным диаметром 100 мм, что позволяет исследовать крупногабаритные конструкции.

Для аппаратных испытаний автокатодов использовался измерительный стенд, состоящий из высоковольтного источника питания и многоканального осциллографа.

Исследуемый автокатод закреплен на фланцевом держателе. Расстояние между катодом и анодом можно регулировать при установке электродов. На анод подается постоянное напряжение от высоковольтного источника питания.

## Результаты

Для эксперимента была смонтирована конструкция, состоящая из трех катодов, представляющих собой нити диаметром 30...40 мкм из многостенных углеродных нанотрубок. Эта многоэмит-



**Характер излучения**

терная конструкция была размещена на общем основании, в совокупности представляющем собой общий катод. На расстоянии 3 мм от катода был закреплен анод, на который наносили оранжевый люминофор.

Исследование проводили в вакуумной камере при давлении  $10^{-7}$  мм рт. ст. В ходе эксперимента к аноду подавали положительное напряжение в диапазоне 0...5 кВ. В ходе исследования фиксировали напряжение, подаваемое на анод, а также ток эмиссии между анодом и каждым из образцов.

В данном эксперименте проверяли гипотезу о том, является ли эмиссионная засветка аддитивной, т. е. эмиссионные картины складываются при включении нескольких катодов. Эта гипотеза подтвердилась, что хорошо видно на рисунке.

При этом следует понимать, что в общей картине излучения будут небольшие отклонения от теоретических расчетов для многоэмиттерной системы вследствие неоднородности поля и его высокого значения при малом расстоянии между катодами.

Автоэмиссионные свойства катодов исследовали путем измерения вольт-амперной характеристики. При измерении было установлено, что катод включается при напряжении 2 кВ. Целевое значение тока эмиссии 50 мкА достигается при анодном напряжении 3 кВ.

Также в ходе исследования проверяли гипотезу о влиянии токовых тренировок на эмиссионные свойства. Известно, что предварительная токовая закалка улучшает эмиссионный ток катодов из углеродных материалов. Это связано с тем, что при токовой тренировке разрушаются нестабильные участки углеродного волокна и формируется структура [9]. Ожидается, что после такой тренировки структура поверхности катода и стабильность тока эмиссии приближаются к оптимальному значению [10].

Для проверки этой гипотезы проводили токовую тренировку катода в течение 30 мин. Однако после этой процедуры заметного снижения анодного напряжения, необходимого для получения эмиссионного тока 50 мкА, не наблюдали. Это говорит о том, что для такого типа материалов токовая тренировка не приводит к оптимизации структур поверхности.

### **Заключение**

В данной работе исследованы автоэмиссионные свойства многоэмиттерного катода, представляющего собой нити из многостенных углеродных нанотрубок. Эти катоды показали хорошее свечение при низком напряжении включения и низком рабочем напряжении. В ходе исследования подтвердилась гипотеза об аддитивности картин излучения отдельных катодов, что свидетельствует о перспективности такой многоэмиттерной системы.

Практическая значимость исследования заключается в возможности использования полученных результатов для разработки новых эффективных автокатодов для ультрафиолетовых ламп, обеспечивающих высокую плотность тока и хорошее время стабильной работы. Простота конструкции катодно-модуляторного узла повышает вероятность коммерческого успеха создания таких ламп.

### **Список литературы**

1. Saito Y., Hata K., Takakura A., Yotani J., Uemura S. Field emission of carbon nanotubes and its application as electron sources of ultra-high luminance light source devices // *Physica B: Condensed Matter*. 2002. Vol. 323. Is. 1–4. P. 30–37.
2. Murakami H., Hirakawa M., Tanaka C., Yamakawa H. Field emission from well-aligned, patterned, carbon nanotube emitters // *Applied Physics Letters*. 2000. Vol. 76. Is. 13. P. 1776–1778.
3. Knapp W., Schleussner D., Baturin A. S., Yeskin I. N., Sheshin E. P. CRT lighting element with carbon field emitters // *Vacuum*. 2002. Vol. 69. Is. 1–3. P. 339–344.
4. Obratsov A. N. Vacuum electronic applications of nano-carbon materials, in: *Nanoengineered Nanofibrous Materials* / Ed. by S. Guceri et al. NATO Science Series II. Vol. 169. Dordrecht: Kluwer Academic Publishers. P. 329–339.
5. Елецкий А. В. Углеродные нанотрубки и их эмиссионные свойства // *Успехи физических наук*. 2002. № 4 (172). С. 401–438.

6. **Елецкий А. В.** Холодные полевые эмиттеры на основе углеродных нанотрубок // Успехи физических наук. 2010. Т. 180. № 9. С. 897—930.

7. **Endo M., Koyama T., Hishiyama Y.** Structural Improvement of Carbon Fibers Prepared from Benzene // Japanese Journal of Applied Physics. 1976. Vol. 15. Is. 11. P. 2073.

8. **Saito Y., Uemura S., Hamaguchi K.** Cathode Ray Tube Lighting Elements with Carbon Nanotube Field Emitters // Japanese Journal of Applied Physics. 1998. N. 37. P. L346—L348.

9. **Бондаренко Б. В., Макуха В. И., Шешин Е. П.** Автоэлектронные эмиттеры с развитой рабочей поверхностью // Электронная техника. Сер. 1. Электроника СВЧ. 1984. № 10. С. 44—47.

10. **Бондаренко Б. В., Макуха В. И., Рыбаков Ю. Л., Шаров В. Б., Шешин Е. П.** Модель микрорельефа автокатода с развитой эмиттирующей поверхностью // Физические явления в электронных приборах. М.: МФТИ, 1986. С. 18—21.

**S. S. Shaposhnikov**, Postgraduate Student, sergey.shaposhnikov@phystech.edu, Moscow Institute of Physics and Technology (National Research University), Dolgoprudny, Moscow region

*Corresponding author:*

**Sergey S. Shaposhnikov**, Postgraduate Student, Moscow Institute of Physics and Technology (National Research University), Dolgoprudny, Moscow region

E-mail: sergey.shaposhnikov@phystech.edu

## Investigation of Field Emission Properties of Multi-Emitter Carbon Nanotube Cathodes

*Received on: June 07, 2022*

*Accepted on: July 01, 2022*

*Currently, scientists are actively studying the properties of cathodes based on various carbon materials, including carbon nanotubes. The purpose of this work is the possibility of using multi-emitter carbon nanotube cathodes for the development of field cathodes. A study was made of the field emission properties of multi-emitter cathodes based on filaments of multi-walled carbon nanotubes. For the experiments, a structure was assembled from a plurality of cathodes placed on a common base. As a result, the hypothesis of additivity of currents at low voltage was confirmed.*

**Keywords:** field emission, field-emission cathodes, carbon field radiating cathodes, multi-emitter cathodes, carbon nanotubes

*For citation:*

**Shaposhnikov S. S.** Investigation of Field Emission Properties of Multi-Emitter Carbon Nanotube Cathodes, *Nano- i Mikrosistemnaya Tekhnika*, 2022, vol. 24, no. 6, pp. 279—282.

DOI: 10.17587/nmst.24.279-282

### References

1. **Saito Y., Hata K., Takakura A., Yotani J., Uemura S.** Field emission of carbon nanotubes and its application as electron sources of ultra-high luminance light source devices, *Physica B: Condensed Matter*, 2002, vol. 323, is. 1—4, pp. 30—37.

2. **Murakami H., Hirakawa M., Tanaka C., Yamakawa H.** Field emission from well-aligned, patterned, carbon nanotube emitters. *Applied Physics Letters*, 2000, vol. 76, is. 13, pp. 1776—1778.

3. **Knapp W., Schleussner D., Baturin A. S., Yeskin I. N., Sheshin E. P.** CRT lighting element with carbon field emitters, *Vacuum*, 2002, vol. 69, is. 1—3, pp. 339—344.

4. **Obraztsov A. N.** Vacuum electronic applications of nano-carbon materials, in: Nanoengineered Nanofibrous Materials, ed. by S. Guceri et al. NATO Science Series II, vol. 169. Dordrecht, Kluwer Academic Publishers, pp. 329—339.

5. **Eletskii A. V.** Carbon Nanotubes and Their Emission Properties [Uglerodnyye nanotrubki i ikh emissionnyye svoystva], *Physics Uspekhi*, 2002, is. 4 (172), pp. 401—438 (in Russian).

6. **Eletskii A. V.** Cold Field Emitters Based on Carbon Nanotubes [Kholodnyye polevyye emittery na osnove uglerodnykh

nanotrubok], *Physics Uspekhi*, 2010, vol. 180, is. 9, pp. 897—930 (in Russian).

7. **Endo M., Koyama T., Hishiyama Y.** Structural Improvement of Carbon Fibers Prepared from Benzene. *Japanese Journal of Applied Physics*, 1976, vol. 15, is. 11, 2073.

8. **Saito Y., Uemura S., Hamaguchi K.** Cathode Ray Tube Lighting Elements with Carbon Nanotube Field Emitters, *Japanese Journal of Applied Physics*, 1998, no. 37, pp. L346—L348.

9. **Bondarenko B. V., Makukha V. I., Sheshin E. P.** Field-Emission Emitters with Developed Work Area [Avtoelektronnyye emittery s razvitoy rabochey poverkhnost'yu]. *Electronics Engineering, Series I. UHF Electronics*, 1984, is. 10, pp. 44—47 (in Russian).

10. **Bondarenko B. V., Makukha V. I., Rybakov Yu. L., Sharov V. B., Sheshin E. P.** Model Microrelief of Field-Emission Cathode with Developed Emissive Surface [Model' mikrorel'yefa avtokatoda s razvitoy emittiruyushchey poverkhnost'yu] in: Physical Phenomena in Electronic Equipment (Fizicheskiye yavleniya v elektronnykh priborakh). Moscow, MIPT, 1986, pp. 18—21 (in Russian).

**Е. А. Климов**<sup>1</sup>, канд. физ.-мат. наук, зав. лаб., **С. С. Пушкарев**<sup>1</sup>, канд. физ.-мат. наук, вед. науч. сотр., s\_s\_e\_r\_p@mail.ru, **А. Н. Клочков**<sup>2</sup>, канд. физ.-мат. наук, ст. преподаватель

<sup>1</sup> Институт сверхвысокочастотной полупроводниковой электроники имени В. Г. Мокерова РАН, Москва,

<sup>2</sup> Научно-исследовательский ядерный университет "МИФИ", Москва

## **ВЛИЯНИЕ ВСТРОЕННОГО ПЬЕЗОЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПОЛЯ НА СПЕКТРЫ ФОТОЛЮМИНЕСЦЕНЦИИ УПРУГО НАПРЯЖЕННЫХ СВЕРХРЕШЕТОК InGaAs/GaAs НА ПОДЛОЖКАХ GaAs (110) И (111)A**

*Поступила в редакцию 05.10.2022*

*Сообщается о проявлении пьезоэлектрического эффекта в спектрах фотолюминесценции сверхрешеток с упруго напряженными квантовыми ямами  $In_xGa_{1-x}As/GaAs$ , выращенных методом молекулярно-лучевой эпитаксии на подложках GaAs с кристаллографической ориентацией поверхности (100), (110) и (111)A.*

**Ключевые слова:** молекулярно-лучевая эпитаксия, GaAs, InGaAs, (110), (111)A, пьезоэлектрический эффект, спектроскопия фотолюминесценции

### **Введение**

Полупроводники GaAs и InGaAs имеют структуру цинковой обманки и нецентросимметричны. Им присущ пьезоэлектрический эффект, заключающийся в возникновении электрической поляризации у деформированных слоев. Поскольку параметр решетки  $In_xGa_{1-x}As$  больше, чем у GaAs, эпитаксиально выращенные слои  $In_xGa_{1-x}As$  на подложке GaAs оказываются упруго напряженными (если толщина слоя не превышает критического значения, при котором начинается релаксация через образование дислокаций). В упруго напряженных слоях  $In_xGa_{1-x}As$  на подложке GaAs со стандартной ориентацией (100) пьезоэффект не возникает ввиду симметрии тензора пьезоэлектрических модулей, в то время как выращенный на подложках GaAs с любыми другими ориентациями слой  $In_xGa_{1-x}As$  становится электрически поляризованным. Амплитуда вектора поляризации в пленке  $In_xGa_{1-x}As$  зависит от рассогласования па-

раметров решетки, т. е. от мольной доли индия  $x$ . Направление поляризации зависит от ориентации подложки: для подложек типа (111) вектор поляризации направлен перпендикулярно плоскости роста, для подложек (110) — в плоскости роста, для прочих подложек — под некоторым углом к поверхности. На границе упруго напряженного слоя  $In_xGa_{1-x}As$  и ненапряженного слоя GaAs происходит скачок вектора поляризации, приводящий к формированию поверхностного заряда, который является источником встроенного электрического поля. Но если поперечное поле возникает за счет пьезоэффекта без дополнительных условий, то для возникновения латерального поля необходимо наличие гетерограниц, перпендикулярных плоскости роста. В идеальной квантовой яме  $In_xGa_{1-x}As$  с продольным вектором поляризации не возникает электрического поля в плоскости роста; для его появления требуются неидеальности либо в виде ступеней на гетерограницах  $In_xGa_{1-x}As/GaAs$ , либо в виде трехмерных островков [1].

Амплитуда электрических полей в таких структурах была оценена в работе [2]: в гетероструктурах InGaAs/GaAs с мольной долей индия  $x \approx 0,2$  пьезоэлектрический заряд, формирующийся на гетерограницах InGaAs/GaAs, может создавать электрические поля порядка  $10^5$  В/см. Мотивацией к данному исследованию является попытка использования этих электрических полей для усиления генерации терагерцевых электромагнитных волн полупроводниковыми гетероструктурами и фотопроводящими антеннами под действием фемтосекундной накачки. Так, амплитуда встроенных электрических полей сравнима с полем в зазоре терагерцевой фотопроводящей антенны.

При взаимодействии фемтосекундных оптических лазерных импульсов с поверхностью полупроводников происходит генерация терагерцевых электромагнитных волн с широким частотным спектром (от субТГц до нескольких ТГц) [3]. Роль встроенного электрического поля в протекающих при этом процессах фотовозбуждения, релаксации и рекомбинации неравновесных носителей нуждается в исследовании, поскольку наличие такого поля может повлиять на значение и направление неравновесного переходного фототока и, следовательно, увеличивать терагерцевый отклик полупроводника. В частности, ранее нами было показано, что полупроводниковые сверхрешеточные структуры  $\{i\text{-LTG-GaAs/GaAsSi}\}$ , выращенные на подложках GaAs (111)A, генерируют более интенсивные импульсы ТГц-излучения, чем такие же структуры на стандартных подложках GaAs (100) [4, 5]. Аналогичный эффект наблюдался нами в пленках  $i\text{-LTG-In}_{0,53}\text{Ga}_{0,47}\text{As}$ , выращенных на подложках InP (100) и (411) [6]. Здесь LTG — *low-temperature-grown* — обозначение пленок, выращенных при пониженной температуре относительно стандартной температуры эпитаксиального роста данного материала.

Известно, что электрическое поле, перпендикулярное плоскости полупроводниковой квантовой ямы (КЯ), приводит к уменьшению энергии пе-

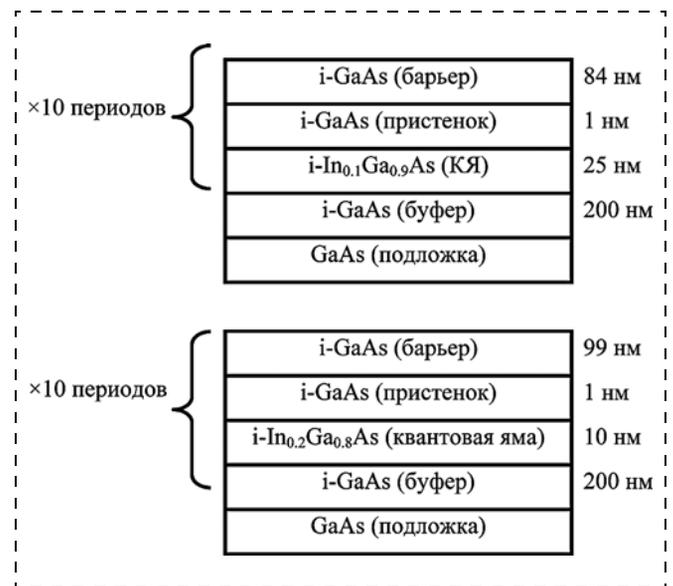


Рис. 1. Дизайн гетероструктур

рехода между уровнями размерного квантования электронов и дырок вследствие квантово-размерного эффекта Штарка. Это обстоятельство может привести к сдвигу пика от КЯ на спектре фотолюминесценции в красную сторону, этот сдвиг неоднократно наблюдался, например, в работах [7–9]. Таким образом, в данной работе анализируется положение оптических линий в спектрах фотолюминесценции гетероструктур InGaAs/GaAs, выращенных на подложках (100), (110) и (111)A, в целях обнаружения в них пьезоэлектрического поля.

### Образцы и методы исследования

В настоящей работе на установке молекулярно-лучевой эпитаксии ЦНА-24 выращены 10-периодные сверхрешетки  $\{\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As/GaAs}\}$  с мольной долей индия  $x = 0,1$  и  $0,2$ . Были использованы подложки GaAs с кристаллографической ориентацией поверхности (100), (110) и (111)A. Дизайн образцов

Параметры эпитаксиального роста гетероструктур

№ образца	Мольная доля индия в КЯ	Ориентация подложки	$T_g, ^\circ\text{C}$			Скорость роста, Å/мин	$\gamma$
			буфера	КЯ	барьера		
105	0,1	(100)	590	480	590	120	33
103		(110)	480	430	480	90	38
104		(111)A	480	430	480	90	39
106	0,2	(100)	590	480	590	120	37
102		(110)	480	430	480	90	38
102		(111)A	480	430	480	90	38

показан на рис. 1, параметры роста образцов указаны в таблице.

Измерения спектров фотолюминесценции (ФЛ) выполняли в оптическом криостате при температуре 77 К. Для возбуждения ФЛ использовали сфокусированное излучение твердотельного лазера с длиной волны 532 нм и плотностью мощности  $\sim 1900$  Вт/см<sup>2</sup>. Сигнал ФЛ в области 1,2...2,0 эВ детектировал фотоэлектронный умножитель ФЭУ-62, охлаждаемый жидким азотом, а в области 0,6...1,2 эВ — неохлаждаемый InGaAs pin-фотодиод Hamamatsu с использованием техники синхронного детектирования.

### Спектры фотолюминесценции

Спектры ФЛ исследуемых сверхрешеток показаны на рис. 2. На спектрах ФЛ всех образцов наблюдаются два пика. Слабый пик с максимумом вблизи 1,50 эВ соответствует слоям GaAs. Второй, более интенсивный пик соответствует оптическим межзонным переходам в КЯ InGaAs/GaAs. Его положение зависит от содержания индия  $x$  в слое  $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ , а также от ориентации подложки. Видно, что выращенная на подложке (111)А сверхрешетка демонстрирует пик, сдвинутый в сторону меньших энергий по сравнению со сверхрешеткой на стандартной подложке (100), в то время как пик сверхрешетки на подложке (110) либо мало смещен ( $x = 0,1$ ), либо вовсе не смещен ( $x = 0,2$ ) по

энергии относительно пика сверхрешетки на подложке (100). Замеченная закономерность может свидетельствовать о существовании встроенного поперечного поля в сверхрешетках на подложках (111)А. Однако сдвиг пика ФЛ также мог быть вызван неодинаковым реальным содержанием индия в КЯ вследствие различного поведения адатомов In на поверхностях (100), (110) и (111)А.

Дополнительным подтверждением того, что причина красного смещения пика ФЛ — встроенное поперечное пьезоэлектрическое поле, является изменение положения пика в зависимости от мощности лазерного излучения, возбуждающего ФЛ. Пик сверхрешетки на (110) не меняет своего положения при уменьшении мощности фотовозбуждения, а пик сверхрешетки на (111)А смещается в сторону меньших энергий, как видно из рис. 3. Данное наблюдение объясняется тем, что электрическое поле экранируется фотовозбужденными носителями заряда, и при их малой концентрации красное смещение пика сверхрешетки, вызванное квантово-размерным эффектом Штарка в случае поперечного поля, проявляется сильнее, чем при большой концентрации [7, 8] (заметим, что пик от слоев GaAs при 1,50 эВ при этом не смещается, поскольку слои GaAs не напряжены и в них не образуется пьезоэлектрическое поле). В случае же латерального поля квантово-размерного эффекта Штарка нет, поэтому экранирование латерального

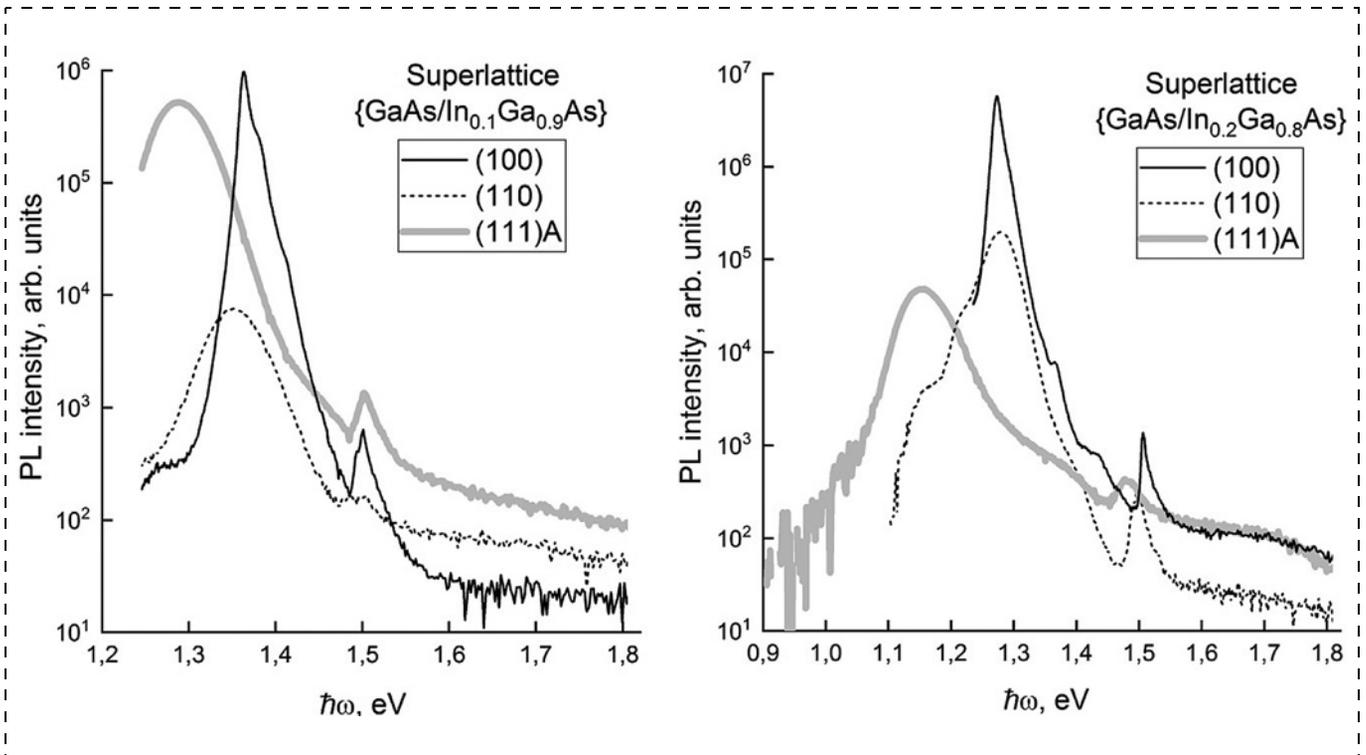


Рис. 2. Спектры ФЛ исследуемых гетероструктур, измеренные при температуре 77 К

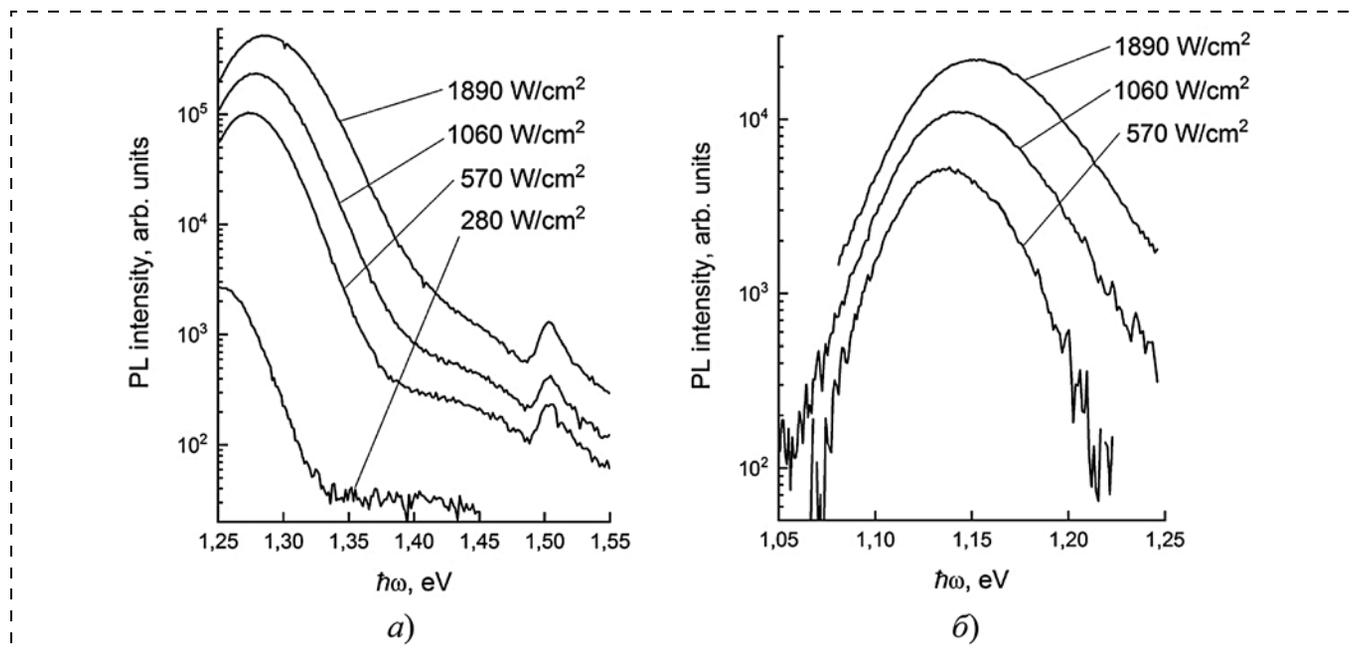


Рис. 3. Смещение пика ФЛ от сверхрешеток, выращенных на подложках GaAs (111)A, в зависимости от плотности мощности лазерного возбуждения:

*a* —  $\{In_{0,1}Ga_{0,9}As/GaAs\} \times 10$ ; *б* —  $\{In_{0,2}Ga_{0,8}As/GaAs\} \times 10$

поля не отражается на энергии электронных переходов в сверхрешетке.

### Заключение

Методом молекулярно-лучевой эпитаксии выращены 10-периодные сверхрешетки с псевдоморфными квантовыми ямами  $\{In_xGa_{1-x}As/GaAs\}$  с мольной долей индия  $x = 0,1$  и  $0,2$ , каждая из сверхрешеток — на подложках GaAs (100), (110) и (111)A. В квантовых ямах сверхрешеток на подложках GaAs (111)A образовалось встроенное пьезоэлектрическое поле, направленное перпендикулярно плоскости слоев, которое проявилось в форме красного смещения пика на спектре ФЛ, причем это смещение увеличивается при уменьшении мощности фотовозбуждения. Пик на спектрах ФЛ от сверхрешеток на подложках GaAs (110) не сдвинут по сравнению с пиком на спектрах сверхрешеток (100) и не смещается при изменении мощности фотовозбуждения.

*Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 22-19-00656, <https://rscf.ru/project/22-19-00656/>*

### Список литературы

1. **Ilg M., Ploog K. H., Trampert A.** Lateral piezoelectric fields in strained semiconductor heterostructures // *Physical Review B*. 1994. Vol. 50. Is. 23. P. 17111. DOI: 10.1103/PhysRevB.50.17111.
2. **Smith D. L., Mailhot C.** Theory of semiconductor superlattice electronic structure // *Reviews of Modern Physics*. 1990. Vol. 62, N. 1. P. 173–234. DOI: 10.1103/RevModPhys.62.173.

3. **Takeuchi H., Yanagisawa J., Hasegawa T., Nakayama M.** Enhancement of terahertz electromagnetic wave emission from an undoped GaAs/n-type GaAs epitaxial layer structure // *Appl. Phys. Lett.* 2008. Vol. 93. P. 081916. DOI: 10.1063/1.2976436.

4. **Галиев Г. Б., Пушкарев С. С., Буряков А. М., Билык В. Р., Мишина Е. Д., Климов Е. А., Васильевский И. С., Мальцев П. П.** Генерация и детектирование терагерцевого излучения в низкотемпературных эпитаксиальных пленках GaAs на подложках GaAs с ориентациями (100) и (111)A // *Физика и техника полупроводников*. 2017. Т. 51. Вып. 4. С. 529–534. DOI: 10.21883/FTP.2017.04.44347.8408.

5. **Буряков А. М., Билык В. Р., Мишина Е. Д., Галиев Г. Б., Климов Е. А., Мальцев П. П., Пушкарев С. С.** Генерация терагерцевого излучения низкотемпературными мультислойными эпитаксиальными пленками i-LT-GaAs/n-GaAs на подложках GaAs с ориентациями (100) и (111)A // *Нано- и микросистемная техника*. 2017. Т. 19. № 2. С. 77–84. DOI: 10.17587/nmst.19.77-84.

6. **Галиев Г. Б., Грехов М. М., Китаева Г. Х., Климов Е. А., Клочков А. Н., Коленцова О. С., Корниенко В. В., Кузнецов К. А., Мальцев П. П., Пушкарев С. С.** Генерация терагерцевого излучения в низкотемпературных эпитаксиальных пленках InGaAs на подложках InP с ориентациями (100) и (411)A // *Физика и техника полупроводников*. 2017. Т. 51. Вып. 3. С. 322–330. DOI: 10.21883/FTP.2017.03.44201.8312.

7. **Vaccaro P. O., Takahashi M., Fujita K., Watanabe T.** Growth by molecular beam epitaxy and photoluminescence of InGaAs/GaAs quantum wells on GaAs (111)A substrates // *Journal of Applied Physics*. 1994. Vol. 76. P. 8037–8041. DOI: 10.1063/1.357923.

8. **Khoо E. A., David J. P. R., Woodhead J., Grey R., Rees G. J.** Photoluminescence linewidths of piezoelectric quantum wells // *Applied Physics Letters*. 1999. Vol. 75. P. 1929–1931. DOI: 10.1063/1.124874.

9. **Chin A., Lee K.** High quality Al(Ga)As/GaAs/Al(Ga)As quantum wells grown on (111)A GaAs substrates // *Applied Physics Letters*. 1996. Vol. 68. P. 3437–3439. DOI: 10.1063/1.115785.

**E. A. Klimov**, Head of Laboratory, Leading Researcher, klimov\_evgenyi@mail.ru;  
**S. S. Pushkarev**, Leading Researcher, s\_s\_e\_r\_p@mail.ru;  
V. G. Mokerov Institute of Ultra High Frequency Semiconductor Electronics of Russian Academy of Sciences; Moscow, 117105, Russian Federation  
**A. N. Klochkov**, Senior Lecturer, klochkov\_alexey@mail.ru;  
National Research Nuclear University "MEPhI"; Moscow, 115409, Russian Federation

*Corresponding author:*

**Sergey S. Pushkarev**, s\_s\_e\_r\_p@mail.ru, leading researcher, V. G. Mokerov Institute of Ultra High Frequency Semiconductor Electronics of Russian Academy of Sciences; Moscow, 117105, Russian Federation.

## Influence of the Built-in Piezoelectric Field on the Photoluminescence Spectra of Strained Superlattices InGaAs/GaAs on GaAs (110) and (111)A Substrates

Received on October 05, 2022

Accepted on October 17, 2022

10-period superlattices with pseudomorphic quantum wells  $\{In_xGa_{1-x}As/GaAs\}$  with indium molar fractions  $x = 0.1$  and  $0.2$  were grown by molecular beam epitaxy, each of them on GaAs substrates with crystallographic surface orientations (100), (110), and (111)A. A built-in piezoelectric field in the quantum wells of superlattices on GaAs (111)A substrates is formed in the direction perpendicular to the plane of the layers, and it causes a red shift of the peak in the photoluminescence spectrum compared to superlattices on conventional GaAs (100) substrates due to the quantum-confined Stark effect. This red shift increases with reducing photoexcitation power, as the photoexcited carriers screen the piezoelectric field. On the other hand, the peak in the photoluminescence spectra of superlattices on GaAs (110) substrates is not redshifted and does not change its energy position with a reducing in the photoexcitation power, since the piezoelectric field, even if it was formed, is directed laterally in the plane of the layers and does not cause quantum-confined Stark effect.

**Keywords:** molecular-beam epitaxy, GaAs, InGaAs, (110), (111)A, piezoelectric effect, photoluminescence spectroscopy

*For citation:*

**Klimov E. A., Pushkarev S. S., Klochkov A. N.** Influence of the Built-in Piezoelectric Field on the Photoluminescence Spectra of Strained Superlattices InGaAs/GaAs on GaAs (110) and (111)A Substrates, *Nano- i Mikrosistemnaya Tekhnika*, 2022, vol. 24, no. 6, pp. 283–287.

DOI: 10.17587/nmst.24.283-287

### References

1. Ilg M., Ploog K. H., Trampert A. Lateral piezoelectric fields in strained semiconductor heterostructures, *Physical Review B*, 1994, vol. 50, iss. 23, p. 17111, DOI: 10.1103/PhysRevB.50.17111
2. Smith D. L., Mailhot C. Theory of semiconductor superlattice electronic structure, *Reviews of Modern Physics*, 1990, vol. 62, N. 1, p. 173–234, DOI: 10.1103/RevModPhys.62.173
3. Takeuchi H., Yanagisawa J., Hasegawa T., Nakayama M. Enhancement of terahertz electromagnetic wave emission from an undoped GaAs/n-type GaAs epitaxial layer structure, *Appl. Phys. Lett.*, 2008, vol. 93, p. 081916, DOI: 10.1063/1.2976436
4. Galiev G. B., Pushkarev S. S., Buriakov A. M., Bilyk V. R., Mishina E. D., Klimov E. A., Vasil'evskii I. S., Maltsev P. P. Terahertz-radiation generation and detection in low-temperature-grown GaAs epitaxial films on GaAs (100) and (111)A substrates, *Semiconductors*, 2017, vol. 51, no. 4, pp. 503–508, <https://doi.org/10.1134/S1063782617040054>
5. Buryakov A. M., Bilyk V. R., Mishina E. D., Galiev G. B., Klimov E. A., Maltsev P. P., Pushkarev S. S. Generation of Terahertz Radiation by Low-Temperature Multilayer Epitaxial

Films of i-LT-GaAs/n-GaAs on GaAs Substrates with (100) и (111)A orientations, *Nano- i mikrosistemnaya tekhnika*, 2017, vol. 19, no. 2, pp. 77–84, DOI: 10.17587/nmst.19.77-84

6. Galiev G. B., Grekhov M. M., Kitaeva G. Kh., Klimov E. A., Klochkov A. N., Kolentsova O. S., Kornienko V. V., Kuznetsov K. A., Maltsev P. P., Pushkarev S. S. Terahertz-radiation generation in low-temperature InGaAs epitaxial films on (100) and (411) InP substrates, *Semiconductors*, 2017, vol. 51, no. 3, pp. 310–317, <https://doi.org/10.1134/S1063782617030071>

7. Vaccaro P. O., Takahashi M., Fujita K., Watanabe T. Growth by molecular beam epitaxy and photoluminescence of InGaAs/GaAs quantum wells on GaAs (111)A substrates, *Journal of Applied Physics*, 1994, vol. 76, pp. 8037–8041, DOI: 10.1063/1.357923

8. Khoo E. A., David J. P. R., Woodhead J., Grey R., Rees G. J. Photoluminescence linewidths of piezoelectric quantum wells, *Appl. Phys. Lett.*, 1999, vol. 75, pp. 1929–1931, DOI: 10.1063/1.124874

9. Chin A., Lee K. High quality Al(Ga)As/GaAs/Al(Ga)As quantum wells grown on (111)A GaAs substrates, *Appl. Phys. Lett.*, 1996, vol. 68, pp. 3437–3439, DOI: 10.1063/1.115785

**И. А. Филиппов**, магистрант, iffilippoff@yandex.ru, **И. А. Пронин**, д-р техн. наук, проф., pronin\_i90@mail.ru, **А. С. Китаев**, аспирант, ar7style436@gmail.com  
Пензенский государственный университет, г. Пенза

## ВЛИЯНИЕ ТЕМПЕРАТУРЫ СПЕКАНИЯ ПОРОШКА ОКСИДА ЦИНКА НА ВАРИСТОРНЫЕ СВОЙСТВА СТРУКТУР НА ЕГО ОСНОВЕ

Поступила в редакцию 14.04.2022

*Приведены результаты исследования влияния температуры спекания и рабочей температуры на электрические параметры варисторной структуры. Были изготовлены образцы варисторных структур при температурах спекания 1000 и 1100 °С из порошка ZnO, синтезированного золь-гель-методом. С помощью растровой электронной микроскопии проведена визуализация микроструктуры поверхности образцов, а также измерены вольт-амперные характеристики в температурном диапазоне 20...200 °С. Полученные результаты позволяют говорить об увеличении степени развитости интерфейсов с ростом температуры спекания. При увеличении рабочей температуры приборных структур наблюдается уменьшение коэффициента нелинейности и увеличение температурного коэффициента электрического сопротивления.*

**Ключевые слова:** варистор, золь-гель-синтез, спекание, растровая электронная микроскопия, вольт-амперная характеристика, температурный коэффициент сопротивления

### Введение

Варистор — нелинейный резистор, который с превышением заданного значения электрического напряжения переходит в низкоомное состояние, что позволяет получать характеристики данного прибора, аналогичные двум встречно включенным полупроводниковым диодам. На сегодняшний день варисторы на основе ZnO являются крайне распространенными элементами электронной техники. Эти устройства применяют для защиты от перенапряжения в твердотельных выключателях — ограничителях перенапряжения [1—3].

Главным преимуществом варисторов на основе ZnO стали нелинейные электрические характеристики, природа которых объясняется наличием потенциального барьера на границе зерен ZnO [4, 5]. Из этого следует, что электрические характеристики варистора находятся в прямой зависимости от его микроструктуры и особенностей интерфейса между зёрнами [5, 6]. В настоящий момент имеются две группы методов изготовления варисторов. К первой относится классический метод смешивания оксидов металлов в шаровой мельнице с дальнейшим получением варисторного порошка и спеканием при достаточно высоких температурах от 1100 до 1200 °С [7, 8]. Тем не менее, классический метод позволяет получать зёрна ZnO с большим размером (десятки микрометров) и широкой функцией распределения по размерам. Стоит отметить, что в микроструктуре варистора данные недостатки негативно сказываются на электрических и прочностных характеристиках. Габаритные размеры итоговой структуры также увеличивают-

ся вследствие перечисленных выше недостатков [5, 9—11]. Вторая группа методов — методы химического синтеза. Среди них одним из самых перспективных является золь-гель-метод, который относительно классических методов первой группы способствует более однородному распределению зерен ZnO, обеспечивает контроль роста самого зерна и не требует высокой температуры спекания. По сравнению с остальными методами химического синтеза он наиболее дешёвый и экологичный [5, 12—15].

Цель работы — исследование зависимости электрических и морфологических характеристик варисторной структуры на основе полупроводникового порошка ZnO, синтезированного золь-гель-методом, от температуры спекания.

### 1. Эксперимент

В разделе описывается методика синтеза порошка ZnO, этапы получения варисторной структуры и исследование температурной зависимости сопротивления варистора.

*Синтез порошка оксида цинка.* Порошок синтезировали из двухводного ацетата цинка  $((\text{CH}_3\text{COO})_2\text{Zn} \cdot 2\text{H}_2\text{O})$  с использованием в качестве реагентов этиленгликоля  $(\text{C}_2\text{H}_4(\text{OH})_2)$ , изопропанола  $(\text{CH}_3\text{CH}(\text{OH})\text{CH}_3)$ , глицерина  $(\text{C}_3\text{H}_5(\text{OH})_3)$  и моноэтаноламина  $(\text{C}_2\text{H}_7\text{NO})$ . На первом этапе к 10 г ацетата цинка было добавлено 2,5 мл этиленгликоля. Данную смесь выдерживали в муфельной печи в течение 15 мин при температуре 150 °С. Далее происходил процесс охлаждения при комнатной температуре до полного отверждения. Парал-

тельно смешивали 20 мл изопропанола и 2 мл глицерина. После застывания первоначальной смеси ацетата цинка к ней добавляли раствор изопропанола и глицерина. После этого добавлено 1,6 мл моноэтаноламина для гидролиза. Полученный раствор перемешивали в течение 50 мин с использованием магнитной мешалки до полной однородности. Полученный раствор выпаривали в течение суток, в результате чего был сформирован мокрый гель.

Отжиг геля выполнен в течение 5 ч при температуре в 750 °С. Такой режим необходим для удаления всех органических веществ и адсорбированной воды. В результате отжига получен аэрогель, который перемалывали в ступке для устранения крупных агломератов. В результате данной операции получен порошок, масса которого составила 2 г.

**Изготовление варисторной структуры.** Для изготовления варисторной структуры порошок ZnO был смешан с глицерином до получения пластичной массы, которая была нанесена на ситаловые и кремниевые подложки. Образцы проходили этап сушки в течение 20 мин при 200 °С, а затем процесс спекания на протяжении 1,5 ч. Первая серия образцов спекалась при 1000 °С, а вторая серия — при 1100 °С. После отжига с помощью токопроводящего клея "Контактола" были сформированы контакты, вжигание которых осуществлялось в течение 20 мин при температуре 200 °С.

**Исследование температурной зависимости электрического сопротивления образцов.** Нагрев образцов проведен с помощью лабораторной плитки до температур 50, 100, 150, 200 °С. Для снятия вольт-амперной характеристики (ВАХ) в качестве источника постоянного тока использован мегаомметр. Для снятия значений подаваемого напряжения применен мультиметр.

## 2. Результаты эксперимента и обсуждение

На рис. 1 представлены микрофотографии РЭМ, отображающие структурную организацию образ-

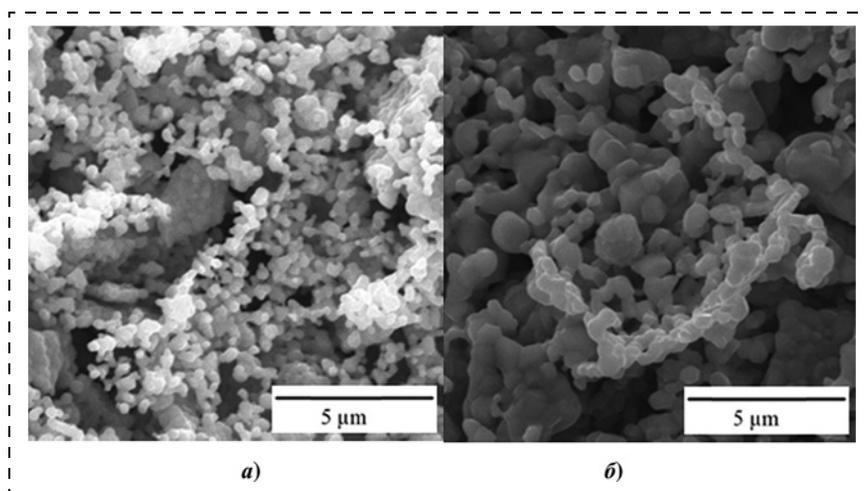


Рис. 1. Микрофотографии РЭМ образцов, спеченных при температуре: а — 1000 °С; б — 1100 °С

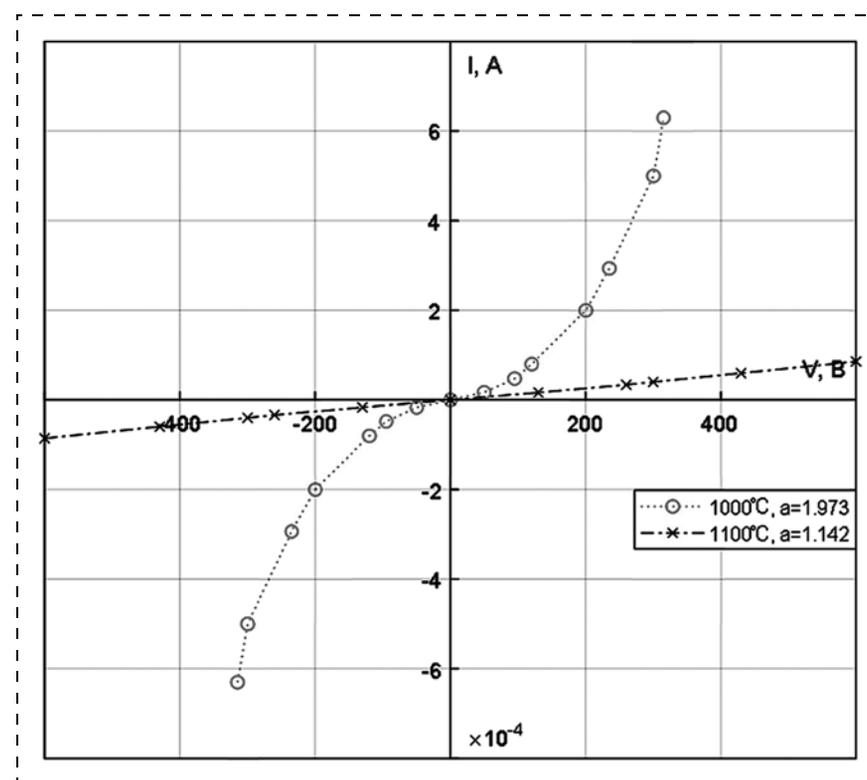


Рис. 2. Семейство  $I$ — $V$  характеристик при комнатной температуре

цов. Образец, спеченный при температуре 1000 °С, изображен на рис. 1, а, образец, спеченный при 1100 °С, — на рис. 1, б.

Вольт-амперные характеристики соответствующих образцов при комнатной температуре представлены на рис. 2 (а — коэффициент нелинейности ВАХ).

На рис. 3 представлены семейства ВАХ образцов, полученных при различных температурах спекания.

На рис. 4 изображены функциональные зависимости сопротивления образцов от рабочей температуры, аппроксимированные линейной функцией.

### 3. Анализ полученных результатов

После проведенного анализа микрофотографий обнаружена заметная разница в степени спекания зерен ZnO: у образцов, полученных при температуре 1100 °С, степень перекрытия интерфейсов гораздо выше, чем у спеченных при 1000 °С, что негативно сказывается на электрических параметрах.

На рис. 2 представлено семейство ВАХ. Из этих данных следует, что характеристика, соответствующая образцу, спеченному при температуре 1100 °С, имеет коэффициент нелинейности на 42 % меньше, чем у образца, спеченного при 1000 °С, и имеет практически линейный вид.

На рис. 3 представлены рассчитанные ВАХ изготовленных образцов при температурах: 20, 50, 100, 150, 200 °С, для каждого образца рассчитаны температурные коэффициенты электрического сопротивления, которые проиллюстрированы на рис. 4. Из полученных данных видно, что с увеличением температуры сопротивление варистора падает, в то время как коэффициент нелинейности, наоборот, растет. По всей видимости, данный результат возникает за счет комбинации эффектов: за счет повышения температуры варистора увеличивается энергия электронов, которая позволяет им преодолеть потенциальный барьер на границе зерен; увеличивается электронная эмиссия на границе зерен; происходит локальный разогрев полупроводника на участках интерфейса, обладающих максимальной кривизной. За счет более развитого межзеренного интерфейса значение температурного коэффициента сопротивления и изменения коэффициента нелинейности ВАХ гораздо выше у образца, спеченного при температуре 1100 °С. При этом стоит заметить, что у структуры, спеченной при температуре 1000 °С, ток, проходя-

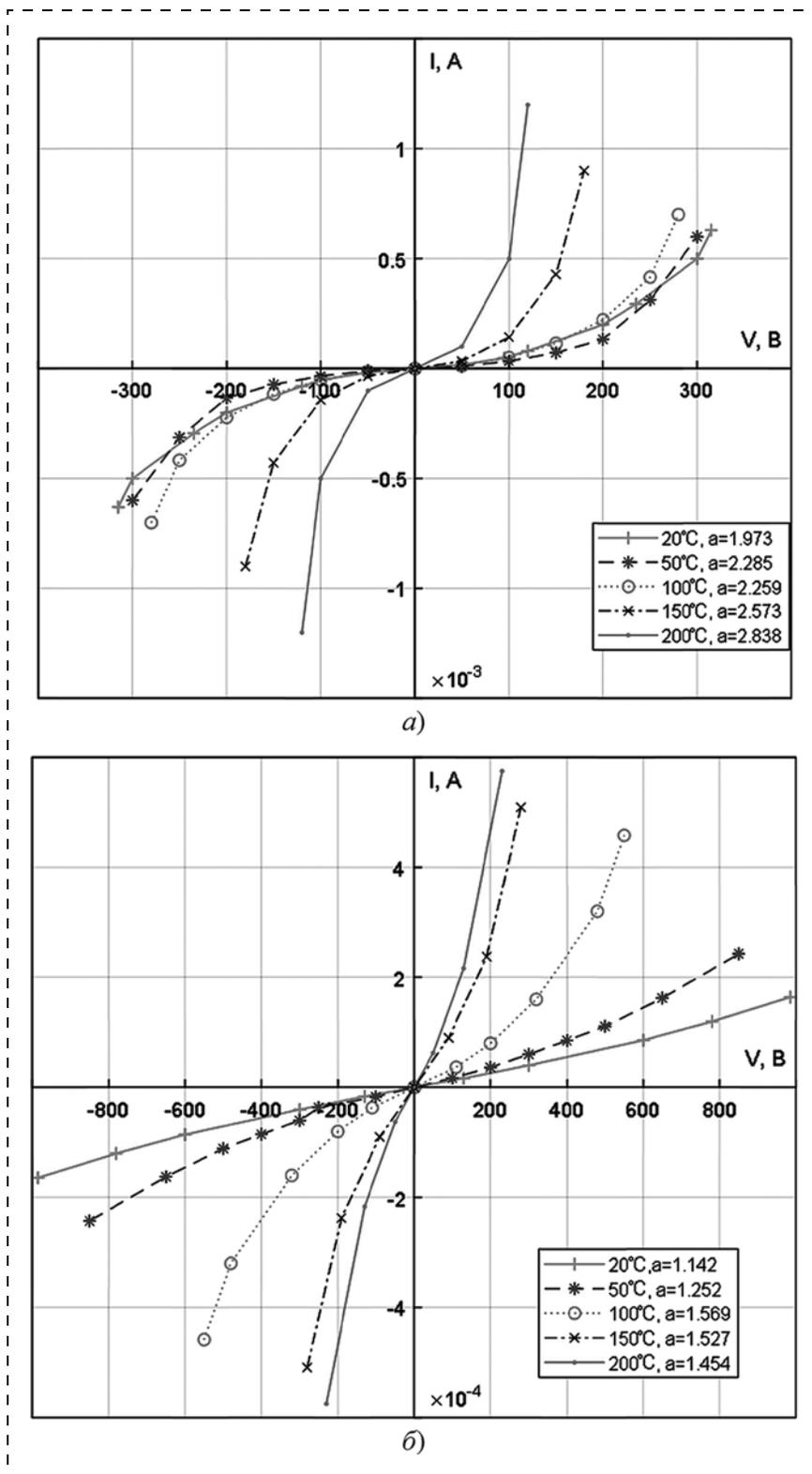


Рис. 3. Семейство ВАХ при различных температурах: а — образец, спеченный при 1000 °С; б — образец, спеченный при 1100 °С

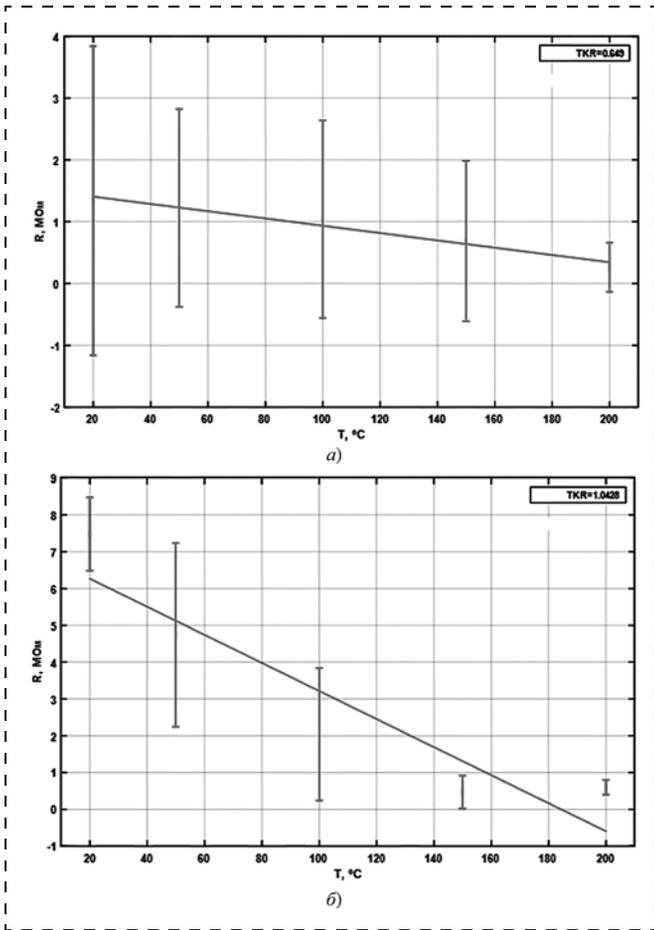


Рис. 4. Аппроксимированные функциональные зависимости сопротивления образца от температуры:

а — образец, спеченный при 1000 °С; б — образец, спеченный при 1100 °С

щий через нее, сильно увеличивается при росте температуры нагрева выше 100 °С.

### Заключение

Проведены исследования варисторных структур, изготовленных из порошка ZnO, синтезированного золь-гель-методом и спеченных при температурах 1000 и 1100 °С. В процессе исследования обнаружено, что микроструктура образца, сформированного при температуре 1100 °С, представлена сильноспеченными зернами ZnO. За счет этого электрические характеристики данного образца являются практически омическим. Также обнаружено, что у варисторов, имеющих развитую структуру межзеренных интерфейсов, с ростом температуры увеличивается электрический ток. Это явление может привести к выходу из строя электрической цепи.

Работа выполнена при поддержке ректорского гранта Пензенского государственного университета Минобрнауки РФ (проект МД-172.2021.4).

1. Magnusson G., Saers R., Liljestrand L., Engdahl G. Eparation of the Energy Absorption and Overvoltage Protection in Solid-State Breakers by the Use of Parallel Varistors // IEEE Transactions on Power Electronics. 2014. Vol. 29 (6). P. 2715–2722.

2. Tuzcek M. N., Hinrichsen V. Recent Experimental Findings on the Single and Multi-Impulse Energy Handling Capability of Metal—Oxide Varistors for Use in High-Voltage Surge Arresters // IEEE Transactions on Power Delivery. 2014. Vol. 29 (5). P. 2197–2205

3. Asaadi J., Conrad J. M., Gollapinni S., Jones B. J. P., Jostlein H., St. John J. M., Strauss T., Wolbers S., Zennamo J. Testing of high voltage surge protection devices for use in liquid argon TPC detectors // Journal of Instrumentation. 2014. Vol. 9 (9).

4. Clarke D. R. Varistor Ceramics // J. Am. Ceram. Soc. 1999. Vol. 82. P. 485–502.

5. Pillai S. C., Kelly, John M., Ramesh Ra., McCormack D. E. Advances in the synthesis of ZnO nanomaterials for varistor devices // Journal of Materials Chemistry C. 2013. Vol. 1 (20). P. 3268–3281.

6. Blatter G., Greuter F. Electrical Properties of Grain Boundaries in Polycrystalline Compound Semiconductors // Semicond. Sci. Technol. 1990. Vol. 5 (1). P. 111–37.

7. Dong Xu, Liyi Sh, Zhenhong Wu, Qingdong Zhong, Xinxin Wu. Microstructure and electrical properties of ZnO—Bi<sub>2</sub>O<sub>3</sub> — based varistor ceramics by different sintering processes // Journal of the European Ceramic Society. 2009. Vol. 29 (9). P. 1789–1794.

8. Boucehkhallal A., Hobar F. Effect of sintering temperature on microstructure and nonlinear electrical characteristics of ZnO varistor // Journal of Advanced Dielectrics. 2018. Vol. 8 (2).

9. Li S., Li J., Liu W. et al. Advances in ZnO varistors in China during the past 30 years — fundamentals, processing, and applications // IEEE Electrical Insulation Magazine. 2015. Vol. 31 (4). P. 35–44.

10. Hamdelou S., Guergouri K., Arab L. The effect of the starting powders particle size on the electrical properties of sintered Co doped ZnO varistors // Applied Nanoscience. 2015. Vol. 5 (7). P. 817–825.

11. Duran P., Tartaj J., Moure C. Fully Dense, Fine-Grained, Doped Zinc Oxide Varistors with Improved Nonlinear Properties by Thermal Processing Optimization // Journal of the American Ceramic Society. 2003. Vol. 86 (8).

12. Cheng L.-H., Zheng L.-Y., Meng L., Li G.-R., Gu Y., Zhang F.-P., Xu Z.-J. Electrical properties of Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-doped ZnO varistors prepared by sol—gel process for device miniaturization // Ceramics International. 2012. Vol. 38. P. 457–461.

13. Siswanto, Rochman N. T., Akwalia P. R. Fabrication and characterization of Zinc Oxide (ZnO) nanoparticle by sol-gel method // Journal of Physics: Conference Series. 2017. Vol. 853.

14. Sedghia A., Noori N. R. Comparison of electrical properties of zinc oxide varistors manufactured from micro and nano ZnO powder // Journal of Ceramic Processing Research. 2011. Vol. 12 (6). P. 752–755.

15. Yang Rong, Qu Xiao, Wang Mao-Hua. Sol—gel synthesis of Ba-doped ZnO nanoparticles and its use in varistor ceramics // Micro & Nano Letters, 2018. Vol. 13 (10). P. 1506–1509.

Corresponding author:

Ivan A. Filippov, Student, Penza State University  
E-mail: ifilippoff@yandex.ru

## Influence of the Sintering Temperature of Zinc Oxide Powder on the Varistor Properties of Structures Based on It

Received on April 14, 2022

Accepted on May 16, 2022

The manufacture of varistors by chemical synthesis is a promising scientific direction. Among the methods of chemical synthesis, the sol-gel method stands out especially, it has an advantage over the classical method due to a more homogenous distribution of ZnO grains and does not require high sintering temperature, moreover, unlike most chemical synthesis methods, it is much cheaper and environmentally friendly. The main purpose of this work is the synthesis of ZnO powder by the sol-gel method, followed by the manufacture of varistor structures and the study of the dependence of their parameters on the sintering temperature and operating temperature. During the work, ZnO powder was synthesized by the sol-gel method, with further fabrication of varistor structures, at sintering temperatures of 1000 °C and 1100 °C. The structure of instrumental samples was studied by scanning electron microscopy, and the current-voltage characteristics were also measured in the temperature range of 20–200 °C. The non-linearity coefficients of the current-voltage characteristic at 20 °C and the temperature coefficient of resistance were calculated. Thus, for the sample sintered at 1000 °C, the coefficient of non-linearity was 1.973 and the temperature coefficient of resistance was 0.649, and for the sample which was sintered at 1100 °C, the coefficient of non-linearity was 1.142 and the temperature coefficient of resistance was 1.0428. These results which were obtained during the work allow us to speak about an increasing in the degree of development of interfaces with the increase in the sintering temperature in turn.

**Keywords:** varistor, sol-gel synthesis, sintering, scanning electron microscopy, current-voltage characteristic, temperature coefficient of resistance

For citation:

Filippov I. A., Pronin I. A., Kitaev A. S. Influence of the Sintering Temperature of Zinc Oxide Powder on the Varistor Properties of Structures Based on It, *Nano- i Mikrosistemnaya Tekhnika*, 2022, vol. 24, no. 6, pp. 288–292.

DOI: 10.17587/nmst.24.288-292

### References

1. Magnusson G., Saers R., Liljestrand L., Engdahl G. Eparation of the Energy Absorption and Overvoltage Protection in Solid-State Breakers by the Use of Parallel Varistors, *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2014, vol. 29 (6), pp. 2715–2722.
2. Tuczek M. N., Hinrichsen V. Recent Experimental Findings on the Single and Multi-Impulse Energy Handling Capability of Metal–Oxide Varistors for Use in High-Voltage Surge Arresters, *IEEE Transactions on Power Delivery*, 2014, vol. 29 (5), pp. 2197–2205.
3. Asaadi J., Conrad J. M., Gollapinni S., Jones B. J. P., Jostlein H., St. John J. M., Strauss T., Wolbers S., Zennamo J. Testing of high voltage surge protection devices for use in liquid argon TPC detectors, *Journal of Instrumentation*, 2014, vol. 9 (9).
4. Clarke D. R. Varistor Ceramics, *J. Am. Ceram. Soc.*, 1999, vol. 82, pp. 485–502.
5. Pillai S. C., Kelly J. M., Ramesh Ra., McCormack D. E. Advances in the synthesis of ZnO nanomaterials for varistor devices, *Journal of Materials Chemistry C*, 2013, vol. 1 (20), pp. 3268–3281.
6. Blatter G., Greuter F. Electrical Properties of Grain Boundaries in Polycrystalline Compound Semiconductors, *Semicond. Sci. Technol.*, 1990, vol. 5 (1), pp. 111–37.
7. Dong Xu, Liyi Sh, Zhenhong Wu, Qingdong Zhong, Xinxin Wu. Microstructure and electrical properties of ZnO–Bi<sub>2</sub>O<sub>3</sub> – based varistor ceramics by different sintering processes, *Journal of the European Ceramic Society*, 2009, vol. 29 (9), pp. 1789–1794.
8. Bouchehlal A., Hobar F. Effect of sintering temperature on microstructure and nonlinear electrical characteristics of ZnO varistor, *Journal of Advanced Dielectrics*, 2018, vol. 8 (2).
9. Li Sh., Li J., Liu W., Lin J., He J., Cheng P. Advances in ZnO varistors in China during the past 30 years? fundamentals, processing, and applications, *IEEE Electrical Insulation Magazine*, 2015, vol. 31 (4), pp. 35–44.
10. Hamdelou S., Guergouri K., Arab L. The effect of the starting powders particle size on the electrical properties of sintered Co doped ZnO varistors, *Applied Nanoscience*, 2015, vol. 5 (7), pp. 817–825.
11. Duran P., Tartaj J., Moure C. Fully Dense, Fine-Grained, Doped Zinc Oxide Varistors with Improved Nonlinear Properties by Thermal Processing Optimization, *Journal of the American Ceramic Society*, 2003, vol. 86 (8).
12. Cheng L.-H., Zheng L.-Y., Meng L., Li, G.-R., Gu Y., Zhang F.-P., Xu Z.-J. Electrical properties of Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-doped ZnO varistors prepared by sol–gel process for device miniaturization, *Ceramics International*, 2012, vol. 38, pp. 457–461.
13. Siswanto, Rochman N. T., Akwalia P. R. Fabrication and characterization of Zinc Oxide (ZnO) nanoparticle by sol-gel method. *Journal of Physics: Conference Series*, 853 (2017).
14. Sedghia A., Noori N. R. Comparison of electrical properties of zinc oxide varistors manufactured from micro and nano ZnO powder, *Journal of Ceramic Processing Research*, 2011, vol. 12 (6), pp. 752–755.
15. Yang Rong, Qu Xiao, Wang Mao-Hua. Sol–gel synthesis of Ba-doped ZnO nanoparticles and its use in varistor ceramics, *Micro & Nano Letters*, 2018, vol. 13 (10), pp. 1506–1509.

**Е. А. Рындин**, д-р техн. наук, проф., e-mail: ryenerator@gmail.com,  
**И. А. Маврин**, магистрант, e-mail: iamavrin@etu.ru, **Н. В. Андреева**, канд. физ.-мат. наук, доц.,  
e-mail: nvandr@gmail.com, **В. В. Лучинин**, д-р техн. наук, проф., зав. каф.,  
e-mail: cmid\_leti@mail.ru  
Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет (ЛЭТИ)  
имени В. И. Ульянова (Ленина), Санкт-Петербург

## НЕЙРОМОРФНЫЙ ЭЛЕКТРОННЫЙ МОДУЛЬ, ОРИЕНТИРОВАННЫЙ НА ИСПОЛЬЗОВАНИЕ МЕМРИСТОРНОЙ ЭКБ, ДЛЯ РАСПОЗНАВАНИЯ ИЗОБРАЖЕНИЙ

*Поступила в редакцию 02.09.2022*

*Рассмотрен метод повышения эффективности аппаратной реализации и минимизации числа электронных синаптических элементов асинхронных импульсных нейронных сетей при решении задач идентификации изображений. Эффективность предложенного метода продемонстрирована в процессе оптимизации параметров нейронов и обучения нейросети на разработанной программной модели и подтверждена результатами SPICE-моделирования и измерения сигналов импульсной нейронной сети, реализованной на серийных электронных компонентах.*

**Ключевые слова:** импульсная нейронная сеть, электронный синаптический элемент, нейрон Мак Каллока-Питтса, LIF-нейрон

Импульсные нейронные сети (ИНС), использующие основные принципы функционирования нейронов мозга [1–3], в настоящее время позволяют эффективно решать задачи идентификации и классификации, прогнозирования, адаптивного управления объектами и многие другие [4, 5], демонстрируя высокую производительность при кардинальном снижении энергопотребления за счет асинхронной параллельной обработки данных, способности к самообучению и адаптивности к рабочей среде и процессу, что выгодно отличает ИНС от классических вычислительных систем на базе архитектуры фон Неймана [6–8].

Максимально эффективное воплощение перечисленных преимуществ требует полностью аппаратной реализации ИНС в рамках асинхронной аналоговой схемотехники, что связано с необходимостью решения целого комплекса проблем в области материаловедения, технологии, схемотехники, системотехники, разработки алгоритмов обучения, в частности, проблем реализации электронных

аналогов синаптических элементов — мемристоров с многоуровневой перестройкой проводимости, которые благодаря малым топологическим размерам (до 2 нм [9, 10]) и эффективной интеграции в кросс-бар массивах обеспечивают высокую плотность записи информации (до 0,7 Тбит/см<sup>2</sup> [11]) при низком энергопотреблении (энергия переключения менее 10 фДж [12]). Основной проблемой при попытках использования мемристоров в качестве элементов резистивной памяти является вариабельность основных рабочих характеристик структур, обусловленная влиянием флуктуаций микроскопических параметров. Более того, в настоящее время не существует "универсального" мемристора, сочетающего в себе весь спектр заявленных преимуществ. Поэтому разработка и совершенствование методов реализации ИНС идет по нескольким направлениям, схематически представленным на рис. 1.

Наиболее быстрым и бюджетным подходом является программная реализация ИНС на базе тра-

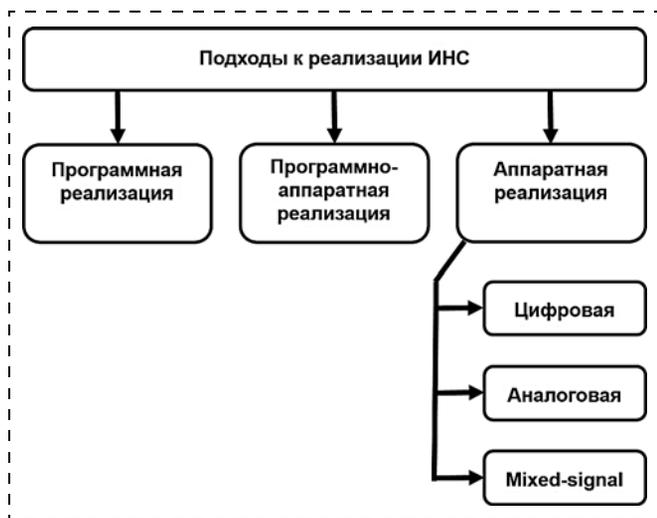


Рис. 1. Основные подходы к реализации импульсных нейронных сетей

диционных вычислительных систем с архитектурой фон Неймана ввиду доступности мощных вычислительных платформ с необходимым программным обеспечением, а также благодаря достаточно широкому выбору программно реализованных ИНС и обучающих баз данных в сети Интернет. При этом программный подход позволяет реализовать лишь часть всех возможных преимуществ искусственных нейронных сетей, что связано с ограничениями традиционных вычислительных систем.

В целях повышения эффективности ИНС на данном этапе широко используют программно-аппаратные варианты реализации (рис. 1), предусматривающие программное управление функционированием аппаратно реализованных узлов нейросети.

Наиболее эффективным подходом с точки зрения достижения преимуществ ИНС является полностью аппаратная реализация. При этом, ввиду упомянутого выше комплекса проблем, развитие данного подхода идет по трем основным направлениям (рис. 1): цифровая реализация; аналоговая реализация; смешанная (mixed-signal) реализация.

Многочисленные варианты реализации ИНС в рамках каждого из этих направлений позволяют в зависимости от имеющихся технологических возможностей, требований к основным параметрам ИНС, срокам реализации и объему капиталовложений получить наиболее приемлемое техническое решение.

В настоящее время расширение спектра задач, решаемых нейронными сетями, происходит в основном за счет усложнения их структуры, увеличения числа нейронов и синапсов. Сети с тысячами нейронов и десятками-сотнями тысяч синапсов позволяют достигать впечатляющих результатов в областях обработки речи, идентификации изображений,

компьютерного зрения и др., но в то же время их использование и обучение требует значительных вычислительных мощностей и затрат энергии. Это недопустимо для встраиваемых автономных систем, которые, как следует из текущих тенденций, составят одну из важнейших областей применения нейронных сетей на кристалле и должны выполнять стоящие перед ними задачи, используя минимальное число элементов, и с минимальными затратами энергии.

Цель данной работы — разработка метода повышения эффективности аппаратной реализации и минимизации числа электронных синаптических элементов асинхронных импульсных нейронных сетей (АИНС) при решении задач идентификации изображений. Для достижения данной цели в работе решали следующие основные задачи: теоретический анализ архитектурных решений АИНС и минимизация числа электронных синаптических элементов за счет декомпозиции задачи идентификации изображений; разработка программной модели АИНС, оптимизация параметров нейронов и обучение нейросети на программной модели (установка весов электронных синаптических элементов); разработка принципиальной электрической схемы АИНС и получение результатов SPICE-моделирования; аппаратная реализация асинхронной импульсной нейронной сети на серийных электронных компонентах.

Задача идентификации изображений может быть решена с использованием различных архитектурных решений нейронной сети, в частности, при идентификации сравнительно малоразмерных изображений может быть использован традиционный однослойный перцептрон [13]. При этом эффективность архитектурного решения определяется следующими основными аспектами:

- эффективность идентификации входного изображения, определяемая по соотношению числа истинно-положительных и ложно-положительных срабатываний;
- энергоэффективность, определяемая затратами энергии на идентификацию одного изображения;
- аппаратные ресурсы (число нейронов и синаптических элементов), необходимые для реализации АИНС.

Перечисленные аспекты, безусловно, взаимосвязаны и их нельзя рассматривать в качестве независимых системных переменных, определяющих эффективность выбранного архитектурного решения. В частности, число нейронов и синаптических элементов аппаратно реализованной сети в значительной степени определяет ее энергоэффективность.

Так для решения задачи идентификации  $K$  черно-белых изображений размером  $P = N \times M$  пик-

селей ( $N$  — число строк,  $M$  — число столбцов) с использованием однослойного перцептрона необходимы  $K$  нейронов и  $C_S$  электронных синапсов, где  $C_S$  определяется выражением

$$C_S = K \times N \times M. \quad (1)$$

При этом каждое входное изображение может быть представлено точкой в  $P$ -мерном пространстве, где координата по каждому из измерений может быть либо 1, либо 0, что будет соответствовать либо черному, либо белому цвету пикселя. Тогда решением задачи классификации будет нахождение расстояния между точкой, соответствующей данному изображению, и точками, соответствующими в рассматриваемом  $P$ -мерном пространстве эталонам изображений. Наименьшее расстояние определит класс, которому в наибольшей степени соответствует анализируемое изображение. Можно видеть, что вычисление расстояния  $R$  между точками в описанном пространстве эквивалентно подсчету числа  $D$  отличающихся пикселей во входном и эталонном изображении ( $R = D^{1/2}$ ), что не вполне соответствует нейросетевой парадигме.

В целях сокращения числа синаптических элементов и снижения энергопотребления АИНС выполним декомпозицию задачи. Обеспечим построчное считывание входного изображения с периодом 100 мкс. Входное изображение состоит из  $N$  строк при  $2^M$  вариантах конфигурации белых и черных пикселей в строке длины  $M$ . Тогда каждое входное изображение может быть представлено траекторией в  $2^M$ -мерном пространстве, где каждое измерение соответствует виду строки, а координата вдоль измерения — номеру строки от 1 до  $N$  (или моменту времени ее сканирования). Тогда задача классификации будет сводиться к сравнению траекторий, описывающих входные изображения, с эталонными траекториями. При таком подходе задача идентификации изображений разделяется на две подзадачи: распознавание строк на первом этапе и идентификация изображения сравнением "траекторий" в  $2^M$ -мерном пространстве на основе последовательности распознанных строк во времени на втором этапе. Первая подзадача может быть решена однослойным перцептроном, в то время как вторая является классической для импульсных нейронов. Таким образом, в рамках разработанного подхода задача решается двухслойной нейронной сетью с перцептронным и импульсным слоями.

При организации первого слоя АИНС, решающего задачу классификации строк, используем классическую схему перцептрона с нейронами Мак Каллока-Питтса [13], а при организации второго слоя, решающего задачу классификации временных последовательностей, — импульсные интеграторы с утечкой (LIF-нейроны — Leakage Integrate and Fire Neurons) [14]. Число синаптических эле-

ментов в рассматриваемой двухслойной архитектуре будет определяться выражением

$$C_S = M \times 2^M + K \times 2^M. \quad (2)$$

Первое слагаемое в выражении (2) определяет число синапсов первого слоя АИНС, а второе слагаемое — число синапсов второго слоя ( $2^M$  — число различных вариантов строк черно-белого изображения длины  $M$ ).

Для выполнения сравнительного анализа архитектурных решений, ускорения и удешевления стадии прототипирования АИНС на языке Python была разработана программная модель двухслойной сети с рассмотренной выше архитектурой, позволяющая выполнить оптимизацию параметров нейронов с последующим обучением нейросети (установкой весов электронных синаптических элементов) на тренировочной выборке изображений и оценку качества обучения на тестовой выборке. В программной модели поведение нейронов Мак Каллока-Питтса определяется только порогом срабатывания, при превышении которого для заданной конфигурации синаптических весов на выходе нейрона возникает высокий потенциал. Поведение же импульсных LIF-нейронов определяется следующим набором параметров: порогом срабатывания; конфигурацией синаптических весов; постоянной времени утечки; периодом ингибирования; периодом рефрактерности.

Важнейшими из перечисленных параметров являются порог срабатывания нейрона и, для импульсных нейронов, постоянная времени утечки, определяющая скорость накопления мембранного потенциала нейрона до порога срабатывания и вместе с порогом срабатывания и средним значением синаптических весов, определяющая число последовательных входных импульсов, необходимое для накопления критического значения мембранного потенциала, и частоту следования импульсов. В разработанной программной модели использованы значения параметров нейронов, приведенные в табл. 1. Порог срабатывания нейрона перцептронного слоя, выраженный в программной модели в относительных единицах, был определен из соображения, что каждая возможная строка в совокупности "позитивного" и "негативного" представления кодируется  $M$  импульсами, приходящи-

Таблица 1

Параметры нейронов

Параметр	Перцептронный слой	Импульсный слой
Порог срабатывания	767	700
Постоянная времени утечки	—	100 мкс
Время ингибирования	—	50 мкс
Время рефрактерности	—	200 мкс

ми на уникальную комбинацию весов синапсов. Поэтому все синапсы имеют либо минимальное, либо максимальное значение веса, а порог срабатывания в  $M$  раз выше максимального веса синапса.

Параметры нейронов импульсного слоя определяли методом итеративного приближения из некоторых начальных значений, обеспечивающих срабатывание нейрона после сканирования  $M - 1$  или  $M - 2$  строк изображения с блокировкой срабатывания остальных нейронов на то же входное изображение. Значения всех параметров, кроме одного, фиксировали, после чего несколько сетей с разными значениями варьируемого параметра обучались на одном и том же обучающем наборе изображений. Затем на проверочном наборе изображений, неизменном в течение всего процесса обучения, качество работы сети оценивали по критерию минимизации ошибки, вычисляемой по формуле [15]

$$E_w = \frac{n^-}{n^+ + n^-} \frac{N_p}{N_p - 1}, \quad (3)$$

где  $n^+$  — число истинно-положительных срабатываний;  $n^-$  — число ложно-положительных срабатываний;  $N_p$  — число разных изображений в обучающей последовательности.

Процедура повторялась для каждого параметра, пока средняя ошибка распознавания не достигала локального минимума. После оптимизации каждого параметра, проверялись средние значения ошибки распознавания для нескольких сетей с параметрами в окрестности найденных значений — все они были больше, чем у сети с набором параметров, найденным методом итеративного приближения.

После оптимизации параметров нейронов выполняли обучение сети. Так как веса первого слоя были определены из общего представления о задаче, обучение по правилу Хебба [16] потребовалось только для второго, импульсного, слоя. Серьезную проблему в ходе обучения представляло явление избыточного обучения, когда несколько нейронов в слое обучались на распознавание одного изображения. Данная проблема частично решалась подбором периода ингибирования и применением алгоритма "победитель получает все", когда накопленные потенциалы нейронов сбрасываются в момент срабатывания одного из нейронов данного слоя. Однако, чтобы получить сеть, обученную на все категории обучающих данных, потребовалось провести выборку подходящих нейронов из множества независимо обучаемых сетей.

Результаты исследования на программной модели процесса обучения как однослойного перцептрона, так и рассматриваемой двухслойной АИНС, для различных наборов изображений показали недостаточно высокую эффективность идентифика-

ции (менее 60 %). В целях решения данной проблемы при построчном считывании изображения первым слоем сети выполняли анализ не только исходного "позитивного" изображения, но и "негативного", с инвертированной яркостью пикселей. Таким образом, число входных импульсов первого слоя АИНС для каждой строки удваивается, а общее число синаптических элементов двухслойной архитектуры определяется выражением

$$C_S = (2M + K) \times 2^M. \quad (4)$$

Как следует из выражения (4), основным достоинством данного подхода является независимость числа синаптических элементов от числа строк  $N$  в исследуемом изображении. При этом анализ "негативного" изображения значительно повышает эффективность процесса идентификации (не менее 90 % для исследованной обучающей выборки).

На рис. 2 показаны зависимости числа синаптических элементов  $C_S$  от размера изображения в однослойном перцептроне (выражение (1), сплошные линии) и в двухслойной АИНС с построчной обработкой изображений (выражение (4), штриховая линия), для  $K = 20$ .

Можно видеть, что при идентификации изображений от  $10 \times 3$  до  $200 \times 12$  пикселей необходимое число синапсов в однослойном перцептроне увеличивается от 600 до 50 000, тогда как использование двухслойной архитектуры позволяет для любо-

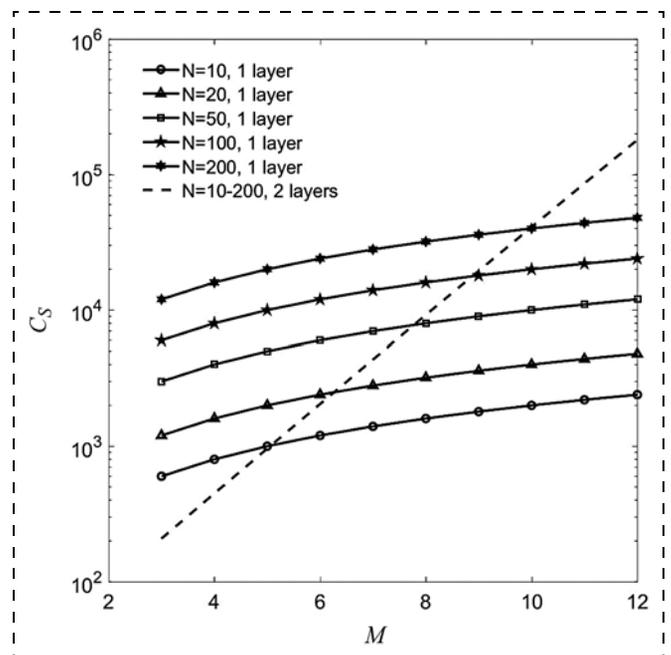


Рис. 2. Зависимость числа  $C_S$  синаптических элементов АИНС от размера ( $N \times M$  пикселей) идентифицируемого статического изображения при числе идентифицируемых изображений  $K = 20$  (сплошные линии — однослойный перцептрон; штриховая линия — двухслойная АИНС с построчной обработкой изображения)

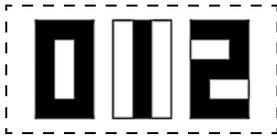


Рис. 3. Эталонные изображения

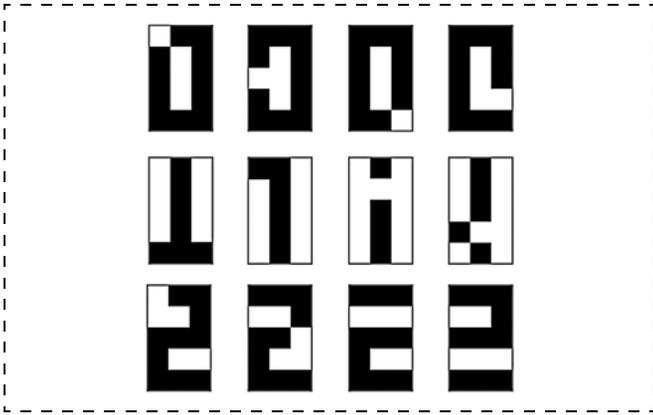


Рис. 4. Выборка тестовых изображений

го  $N$  уменьшить общее число синаптических элементов, если число  $M$  пикселей в строке меньше некоторого значения, которое можно найти, приравняв правые части выражений (1) и (4).

В целях апробации предложенного варианта декомпозиции задачи идентификации изображений и анализа рассмотренной двухслойной архитектуры была разработана и исследована нейронная сеть, определяющая отношения входных изображений к трем классам, в качестве которых были выбраны символы 0, 1, 2, а точнее, их эталонные черно-белые изображения с пространственным разрешением  $5 \times 3$  пикселей, приведенные на рис. 3.

В качестве тестовой выборки использовали вариации изображений, отличающиеся от эталонов на один пиксель и представленные на рис. 4.

Функциональная схема разработанной двухслойной асинхронной аналоговой импульсной нейронной сети приведена на рис. 5.

Формирователь входных импульсов обеспечивает построчное считывание входного изображе-

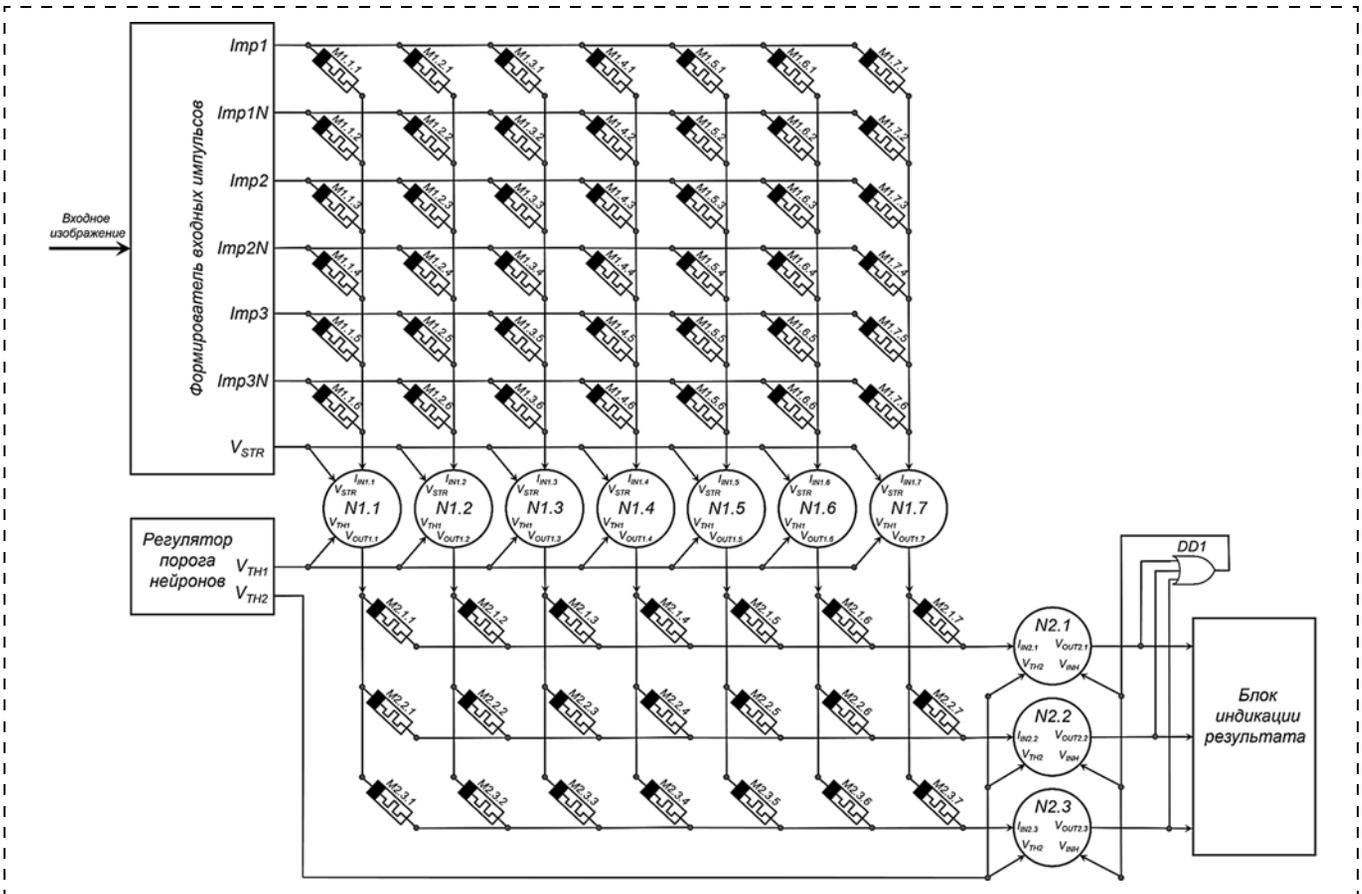


Рис. 5. Функциональная схема двухслойной АИНС для построчной обработки и идентификации статического изображения ( $Imp1—Imp3$  — строчные импульсы "положительного" изображения;  $Imp1N—Imp3N$  — строчные импульсы "негативного" изображения;  $V_{STR}$  — стробирующие импульсы нейронов первого слоя;  $V_{TH1}, V_{TH2}$  — пороги срабатывания нейронов первого и второго слоев соответственно;  $M1.1.1—M1.7.6$  — синаптические элементы первого слоя;  $M2.1.1—M2.3.7$  — синаптические элементы второго слоя;  $N1.1—N1.7$  — нейроны первого слоя;  $N2.1—N2.3$  — нейроны второго слоя;  $I_{IN1.1}—I_{IN1.7}$  — входные токи нейронов первого слоя;  $I_{IN2.1}—I_{IN2.3}$  — входные токи нейронов второго слоя;  $V_{OUT1.1}—V_{OUT1.7}$  — выходные импульсы нейронов первого слоя;  $V_{OUT2.1}—V_{OUT2.3}$  — выходные импульсы нейронов второго слоя;  $V_{INH}$  — импульсы ингибирования нейронов второго слоя)

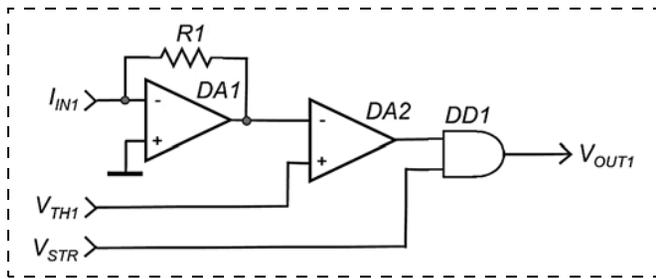


Рис. 6. Схема нейрона первого слоя

ния с заданной периодичностью (временной интервал между строками 10 мкс) и вывод импульсов, соответствующих исходному ("позитивному") изображению, на выходы  $Imp1—Imp3$ , а импульсов, соответствующих инвертированному ("негативному") изображению, на выходы  $Imp1N—Imp3N$ . Длительность формируемых импульсов составляет 1 мкс и определяется длительностью стробирующих импульсов  $V_{STR}$ , вырабатываемых формирователем только при считывании входного изображения (один стробирующий импульс на одну считываемую строку). Одновременно стробирующие импульсы подаются на все нейроны первого слоя, гарантируя отсутствие ложных срабатываний нейронов в результате переходных процессов в их входных цепях.

С выходов формирователя импульсы  $Imp1—Imp3$ ,  $Imp1N—Imp3N$  проходят через матрицу  $6 \times 7$  синаптических элементов резистивной памяти  $M1.1.1—M1.7.6$  и формируют входные токи  $I_{IN1.1}—I_{IN1.7}$  нейронов первого слоя  $M1.1—M1.7$ , представляющих собой нейроны Мак Каллока-Питтса. Схема нейрона первого слоя приведена на рис. 6.

Поскольку все строчные импульсы  $Imp1—Imp3$ ,  $Imp1N—Imp3N$  с выходов формирователя проходят через матрицу синаптических элементов  $M1.1.1—M1.7.6$  одновременно, нейрон первого слоя содержит вместо интегратора с утечкой лишь инвертирующий сумматор  $DA1$ ,  $R1$ , выходное напряжение  $V_{SUM1.X}$  которого определяется выражениями:

$$I_{IN1.X}(t) = \sum_{Y=1}^3 \frac{V_{ImpY}(t)}{M_{1.X.(2Y-1)}} + \frac{V_{ImpYN}(t)}{M_{1.X.(2Y)}}; \quad (5)$$

$$V_{SUM1.X}(t) = -I_{IN1.X}(t)R1, \quad (6)$$

где  $X$  — номер нейрона первого слоя;  $Y$  — номер пиксела строки изображения;  $t$  — время;  $M_{1.X.(2Y-1)}$ ,  $M_{1.X.(2Y)}$  — сопротивления синаптических элементов первого слоя.

Выходное напряжение сумматора  $V_{SUM1.X}$  поступает на инвертирующий вход компаратора  $DA2$  и сравнивается с пороговым напряжением  $V_{TH1}$ , определяемым регулятором порогов нейронов. При достижении условия  $V_{SUM1.X}(t) < V_{TH1}(t)$  нейрон срабатывает, на выходе компаратора устанавливается высокий уровень напряжения, в результате чего

стробирующий импульс  $V_{STR}$  длительностью 1 мкс проходит на выход логического элемента  $DD1$  (2И), определяя длительность выходного импульса нейрона  $V_{OUT1.X}$ .

Выходные импульсы нейронов первого слоя проходят через матрицу синаптических элементов  $M2.1.1—M2.3.7$ , формируя входные токи  $I_{IN2.1}—I_{IN2.3}$  LIF-нейронов второго слоя. Схема нейрона второго слоя приведена на рис. 7. LIF-нейрон включает интегратор с утечкой  $DA1$ ,  $R1$ ,  $C1$ , выходное напряжение  $V_{SUM2.Z}$  которого определяется системой:

$$I_{IN2.Z}(t) = \sum_{F=1}^7 \frac{V_{OUT1.F}(t)}{M_{2.Z.F}}; \quad (7)$$

$$C1 \frac{dV_{SUM2.Z}(t)}{dt} + \frac{V_{SUM2.Z}(t)}{R1} = I_{IN2.Z}(t), \quad (8)$$

где  $Z$  — номер нейрона второго слоя;  $F$  — номер нейрона первого слоя;  $M_{2.Z.F}$  — сопротивления синаптических элементов второго слоя. Постоянная времени утечки  $R1 \cdot C1 = 100$  мкс.

Выходное напряжение интегратора с утечкой  $V_{SUM2.Z}$  поступает на инвертирующий вход компаратора  $DA2$  и сравнивается с пороговым напряжением  $V_{TH2}$ . При достижении условия  $V_{SUM2.Z}(t) < V_{TH2}(t)$  нейрон срабатывает, на выходе компаратора устанавливается высокий уровень напряжения, фронт которого запускает одновибраторы  $DD2$ ,  $R2$ ,  $C2$ ,  $VD1$  и  $DD3$ ,  $R3$ ,  $C3$ ,  $VD2$ , формирующие импульс  $V_{REF}$ , определяющий длительность рефрактерного периода LIF-нейрона — 200 мкс, и выходной импульс  $V_{OUT2.Z}$ , длительность которого определяет длительность периода ингибирования LIF-нейронов — 50 мкс. Диоды  $VD1$  и  $VD2$  необходимы для минимизации времени восстановления одновибраторов.

Импульс  $V_{REF}$  поступает на вход элемента  $DD1$  (2ИЛИ), что приводит к установлению на его вы-

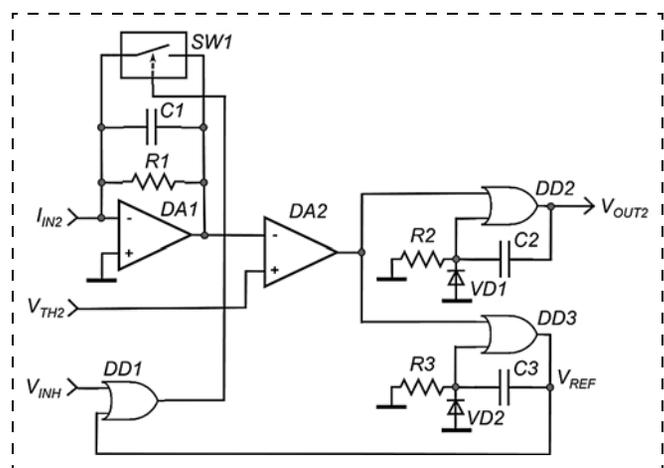


Рис. 7. Схема LIF-нейрона второго слоя

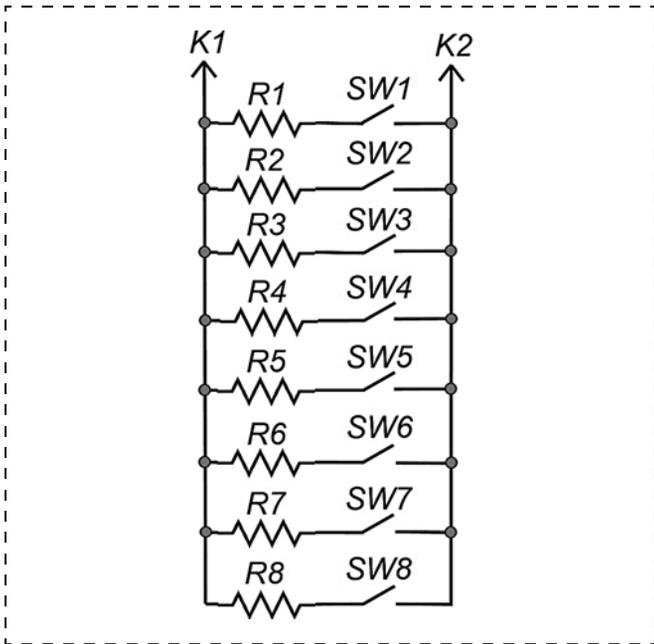


Рис. 8. Схема синаптического элемента

ходе высокого уровня напряжения, переводящего электронный ключ  $SW1$  в низкоомное состояние. В результате конденсатор  $C1$  интегратора разряжается, работа интегратора блокируется, а на его выходе устанавливается низкий уровень напряжения  $V_{SUM2.Z} \approx 0$ . По окончании периода рефрактерности ключ  $SW1$  переводится в высокоомное состояние, а нейрон переходит в исходное состояние при условии отсутствия импульсов ингибирования на входе  $V_{INH}$ . Выходные импульсы нейронов второго слоя поступают в блок индикации результата (см. рис. 5), содержащий дешифратор и индикатор символов.

Учитывая описанные выше проблемы реализации мемристорных кросс-бар массивов, в данном исследовании аппаратную реализацию аналоговой импульсной нейросети в соответствии с функциональной схемой, приведенной на рис. 5, осуществляли с использованием синаптических элементов резистивной памяти в виде переключаемых резисторов. Схема используемого элемента резистивной памяти приведена на рис. 8.

Учитывая исследовательские цели настоящей работы, в данном случае 8-разрядный двоичный код, определяемый в процессе обучения АИНС на программной модели и устанавливаемый вручную посредством переключателей  $SW1—SW8$ , подключает параллельно контактам  $K1$  и  $K2$  резисторы, сопротивления которых определяются выражением

$$R_i = \frac{R_{i-1}}{2}, \quad i = 2, 3, \dots, 8, \quad (9)$$

и обеспечивает возможность установки одного из 256 уровней сопротивления в заданном диапазоне

с погрешностью, определяемой классом точности используемых резисторов.

Полученные с использованием разработанной программной модели матрицы весов перцептронного и импульсного слоев приведены в табл. 2 и 3 соответственно.

При необходимости синаптические элементы, представленные на рис. 8, могут быть заменены более сложными аналогами, описанными в работе [17] и обеспечивающими аппаратную реализацию не только процесса идентификации изображений, но и процесса обучения нейросети.

Временные диаграммы процесса идентификации изображений символов 0, 1 и 2 разработанной импульсной нейронной сетью (см. рис. 5), предобученной на программной модели, полученные в результате схемотехнического моделирования, приведены на рис. 9.

Первые три диаграммы демонстрируют переходные процессы выходных напряжений сумматоров нейронов первого слоя при последовательном анализе изображений символов 0 (в интервале 100...150 мкс), 1 (в интервале 300...350 мкс), 2 (в интервале 500...550 мкс).

На четвертой диаграмме представлены стробирующие импульсы и выходные импульсы нейронов первого слоя. Можно видеть, что каждый нейрон первого слоя безошибочно срабатывает на определенную строку входного изображения.

Пятая диаграмма демонстрирует переходные процессы выходных напряжений интеграторов с

Таблица 2

Матрица весов синаптических элементов первого слоя сети

Нейрон	Вход					
	Imp1	Imp2	Imp3	Imp1N	Imp2N	Imp3N
1	1	1	255	255	255	1
2	1	255	1	255	1	255
3	1	255	255	255	1	1
4	255	1	1	1	255	255
5	255	1	255	1	255	1
6	255	255	1	1	1	255
7	255	255	255	1	1	1

Таблица 3

Матрица весов синаптических элементов второго слоя сети

Нейрон	Вход						
	1	2	3	4	5	6	7
1	21	1	1	1	255	1	255
2	1	255	1	1	1	1	1
3	255	1	56	201	1	1	255

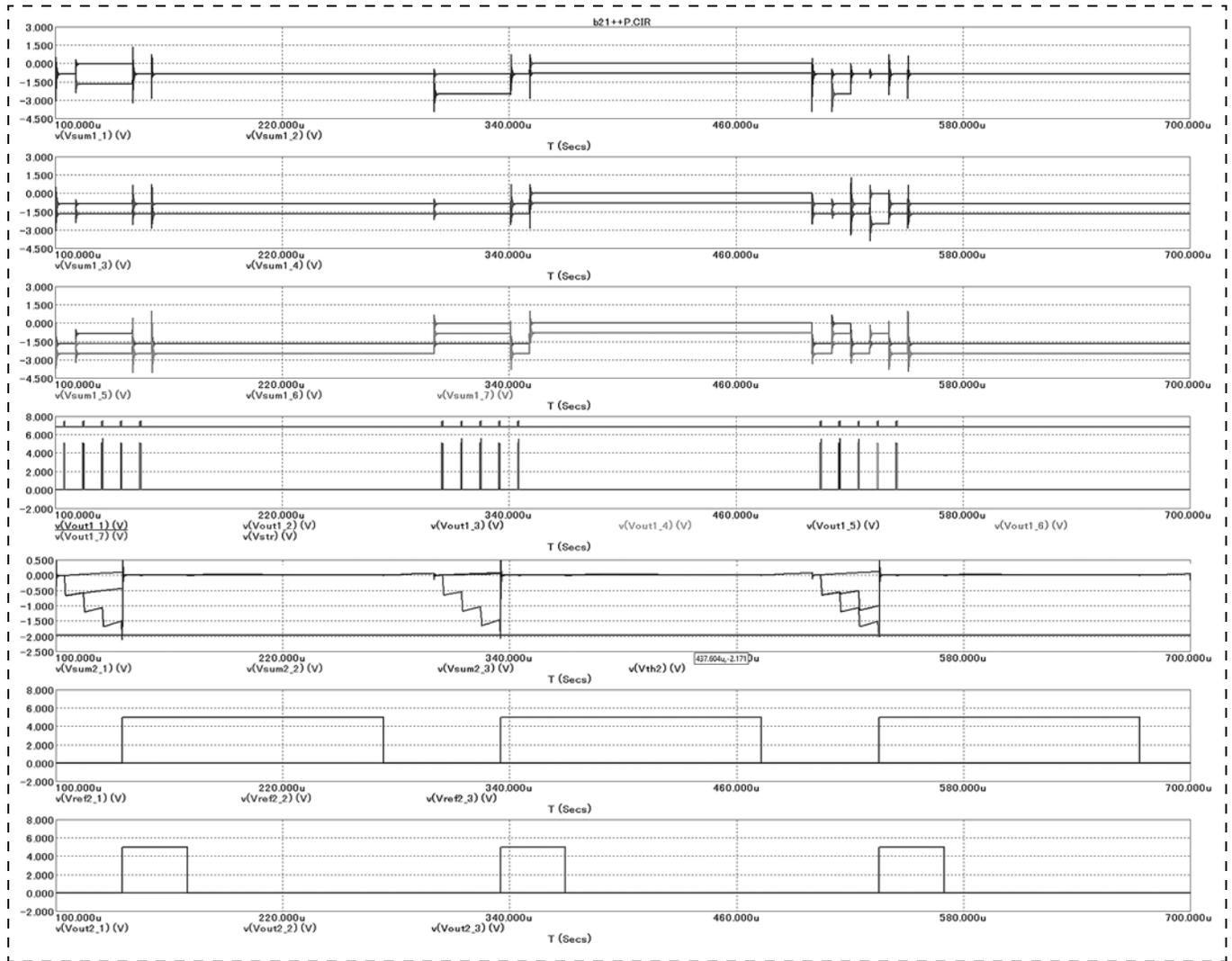


Рис. 9. Временные диаграммы процесса идентификации АИНС черно-белых изображений символов 0, 1 и 2 размером 5×3 пикселей

утечкой LIF-нейронов второго слоя. Можно видеть, что выходные импульсы нейронов первого слоя, проходя через синаптическую матрицу второго слоя, ступенчато увеличивают отрицательные напряжения на выходах интеграторов с утечкой, и в зависимости от последовательности идентифицированных строк изображения в одном из трех LIF-нейронов напряжение интегратора раньше достигает порогового значения  $V_{TH2}$ , что приводит к формированию в сработавшем нейроне импульсов, определяющих периоды рефрактерности 200 мкс (шестая диаграмма) и ингибирования 50 мкс (седьмая диаграмма). При этом на выходе соответствующего интегратора устанавливается низкий уровень напряжения  $V_{SUM2.Z} \approx 0$ .

Рассматриваемая программно предобученная аналоговая двухслойная импульсная нейронная сеть была реализована аппаратно на серийных SMD-элементах в соответствии со схемами, приведенными на рис. 5–8. Осциллограммы АИНС, снятые

четырёхканальным осциллографом фирмы Keysight Technologies, приведены на рис. 10.

Канал 1 демонстрирует стробирующие импульсы  $V_{STR}$ , вырабатываемые только при считывании входного изображения (один стробирующий импульс на одну считываемую строку) и определяющие длительность выходных импульсов нейронов первого слоя (1 мкс) и предотвращающие ложные срабатывания нейронов в результате переходных процессов в их входных цепях. Канал 2 отображает выходное напряжение  $V_{SUM}$  интегратора одного из нейронов второго слоя при значениях порогового напряжения  $V_{TH2} = 2,7$  В (рис. 10, а) и  $V_{TH2} = 3,7$  В (рис. 10, б), демонстрируя процесс накопления мембранного потенциала при поступлении входных импульсов и его сброс при достижении порога. Каналы 3 и 4 отображают импульсы  $V_{REF}$  и  $V_{INH}$ , формируемые в момент срабатывания нейрона и определяющие периоды рефрактерности (200 мкс) и ингибирования (50 мкс) соответственно.

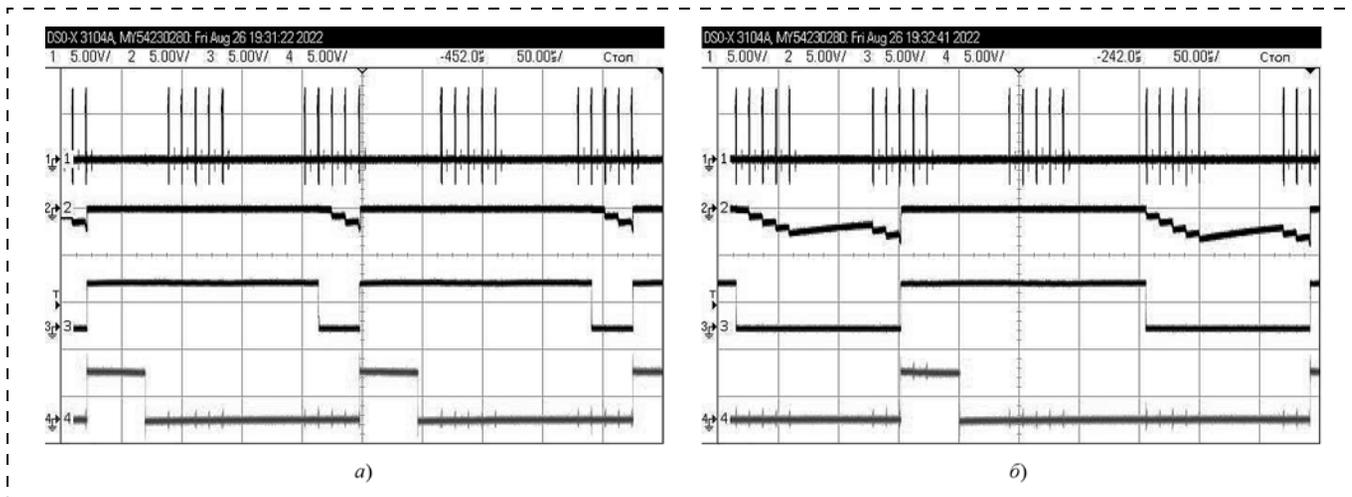


Рис. 10. Осциллограммы АИНС при пороговых напряжениях LIF-нейронов  $V_{THz} = 2,7$  В (а) и  $V_{THz} = 3,7$  В (б):

канал 1 — стробирующие импульсы; канал 2 — выходные напряжения интеграторов LIF-нейронов; канал 3 — импульсы, определяющие период рефрактерности; канал 4 — импульсы, определяющие период ингибирования

Таким образом, при выполнении данного исследования разработан метод повышения эффективности аппаратной реализации и минимизации числа электронных синаптических элементов асинхронных импульсных нейронных сетей при решении задач идентификации изображений за счет декомпозиции задачи. Эффективность предложенного метода продемонстрирована в процессе оптимизации параметров нейронов и обучения нейросети на разработанной программной модели и подтверждена результатами SPICE-моделирования разработанной принципиальной электрической схемы АИНС и результатами измерения сигналов нейронной сети, реализованной на серийных электронных компонентах.

*Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации — государственное задание в области научной деятельности FSEE-2020-0013.*

### Список литературы

1. Basheer I., Hajmeer M. Artificial Neural Networks: Fundamentals, Computing, Design, and Application // Journal of Microbiological Methods. 2000. N. 43. P. 3—31.
2. Gokmen T., Vlasov Y. Acceleration of Deep Neural Network Training with Resistive Cross-Point Devices: Design Considerations // Frontiers in Neuroscience. 2016. V. 10. Article ID 333. <https://doi.org/10.3389/fnins.2016.00333>
3. Рамбиди Н. Г. Возможные пути эффективного воплощения нейросетевых устройств. Квазибиологическая парадигма // Нано- и микросистемная техника. 2002. № 4. С. 21—30.
4. Kornijcuk V., Jeong D. Recent Progress in Real-Time Adaptable Digital Neuromorphic Hardware // Advanced Intelligent Systems. 2019. V. 1. Article ID 1900030.
5. Potok T., Schuman C., Young S. et al. A Study of Complex Deep Learning Networks on High-Performance, Neuro-

morphic, and Quantum Computers // ACM Journal on Emerging Technologies in Computing Systems (JETC). 2018. V. 14, N. 2. P. 1—21.

6. Петров А., Алексеева Л., Иванов А. и др. На пути к нейроморфной мемристорной компьютерной платформе // Наноиндустрия. 2016. № 1 (63). С. 94—109.

7. Andreeva N. V., Ryndin E. A., Gerasimova M. I. Memristive logic design of multifunctional spiking neural network with unsupervised learning // BioNanoScience. 2020. N. 10. P. 824—833. <https://doi.org/10.1007/s12668-020-00778-2>

8. Bichler O., Querlioz D., Thorpe S. J. et al. Extraction of temporally correlated features from dynamic sensors with spike-timing-dependent plasticity // Neural Networks. 2012. V. 32. P. 339—348.

9. Zhang Y., Wang Zh., Zhu J. et al. Brain-Inspired Computing with Memristors: Challenges in Devices, Circuits and Systems // Appl. Phys. Rev. 2020. V. 7. 011308. DOI: 10.1063/1.5124027.

10. Xia Q., Yang J. Memristive Crossbar Arrays for Brain-Inspired Computing // Nature Materials. 2019. N. 18. P. 309—323.

11. Pi S., Li C., Jiang H. et al. Memristor crossbar arrays with 6-nm half-pitch and 2-nm critical dimension // Nature Nanotechnology. 2019. N. 14. P. 35—39.

12. Goux L., Fantini A., Kar G. et al. Ultralow sub-500nA operating current high-performance TiN/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/HfO<sub>2</sub>/Hf/TiN bipolar RRAM achieved through understanding-based stack-engineering // 2012 Symposium on VLSI Technology (VLSIT). IEEE, Honolulu, HI, USA. 2012. P. 159—160.

13. McCulloch W. S., Pitts W. A logical calculus of ideas immanent in nervous activity // Bulletin of Mathematical Biophysics. 1943. N 5. P. 115—133.

14. Burkitt A. N. A Review of the Integrate-and-fire Neuron Model: I. Homogeneous Synaptic Input // Biological Cybernetics. 2006. N 95 (1). P. 1—19.

15. Kiselev M. V. A synaptic plasticity rule providing a unified approach to supervised and unsupervised learning // Proceedings of IJCNN-2017, Anchorage. 2017. P. 3806—3813.

16. Hebb D. O. The Organization of Behavior. — New York: Wiley & Sons, 1949. 335 p.

17. Рындин Е. А., Андреева Н. В., Лучинин В. В., Гончаров К. С., Райимжонов В. С. Нейроморфные функциональные модули импульсной нейронной сети // Нано- и микросистемная техника. 2021. Т. 23. № 6. С. 317—326. DOI: 10.17587/nmst.23.317-326.

**E. A. Ryndin**, Professor, e-mail: rynenator@gmail.com, **I. A. Mavrin**, Student, e-mail: iamavrin@etu.ru, **N. V. Andreeva**, Associate Professor, e-mail: nvandr@gmail.com, **V. V. Luchinin**, Professor, e-mail: cmid\_leti@mail.ru, Saint Petersburg Electrotechnical University "LETI", Professora Popova St. 5, Saint Petersburg, 197376, Russian Federation

*Corresponding author:*

**Natalia V. Andreeva**, Associate Professor, Saint Petersburg Electrotechnical University "LETI", Professora Popova St. 5, Saint Petersburg, 197376, Russian Federation, e-mail: nvandr@gmail.com

## Neuromorphic Electronic Module, focused on the Use of Memristor ECB, for Image Recognition

Received on September 2, 2022  
Accepted on September 30, 2022

Currently, the expansion of the range of tasks solved by neural networks occurs mainly due to the complication of their structure, an increase in the number of neurons and synapses. Networks with thousands of neurons and tens to hundreds of thousands of synapses can achieve impressive results in the areas of speech processing, image identification, computer vision, etc., but at the same time, their use and training require significant computing power and energy costs. This is unacceptable for embedded autonomous systems, which, as follows from current trends, will constitute one of the most important applications for neural networks on a chip and must perform their tasks using a minimum number of elements and with minimal energy consumption.

In this article a method for increasing the efficiency of hardware implementation and minimizing the number of electronic synaptic elements of asynchronous spiking neural networks (ASNN) in solving image identification problems was developed. To achieve this goal, a theoretical analysis of ASNN architectural solutions was carried out, the number of electronic synaptic elements was minimized due to the decomposition of the image identification problem, an ASNN software model was developed, neuron parameters were optimized and the neural network was learned (the weights of electronic synaptic elements were set) on a software model. An ASNN electrical circuit was developed and the results of SPICE modeling were obtained. A hardware implementation of an asynchronous spiking neural network on serial electronic components was performed.

The effectiveness of the proposed method was demonstrated in the process of optimizing the parameters of neurons and learning the neural network on the developed software model and confirmed by the results of SPICE modeling of the developed electrical circuit of the ASNN and the results of measuring the signals of the neural network implemented on serial electronic components.

The research performed at the Saint Petersburg Electrotechnical University was funded by the grant FSEE-2020-0013 of the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation.

**Keywords:** spiking neural network, electronic synaptic element, McCulloch-Pitts neuron, LIF-neuron

*For citation:*

**Ryndin E. A., Mavrin I. A., Andreeva N. V., Luchinin V. V.** Neuromorphic Electronic Module, focused on the Use of Memristor ECB, for Image Recognition, *Nano- i Mikrosistemnaya Tekhnika*, 2022, vol. 24, no. 6, pp. 293–303.

DOI: 10.17587/nmst.24.293-303

### References

1. **Basheer I., Hajmeer M.** Artificial Neural Networks: Fundamentals, Computing, Design, and Application, *Journal of Microbiological Methods*, 2000, no. 43, pp. 3–31.
2. **Gokmen T., Vlasov Y.** Acceleration of Deep Neural Network Training with Resistive Cross-Point Devices: Design Considerations, *Frontiers in Neuroscience*, 2016, vol. 10, article ID 333, <https://doi.org/10.3389/fnins.2016.00333>.
3. **Rambidi N. G.** Vozmozhnyye puti effektivnogo voploscheniya nejrossetevykh ustrojstv. Kvazibiologicheskaya paradigma, *Nano- i Mikrosistemnaya Tekhnika*, 2002, no. 4, pp. 21–30 (in Russian).
4. **Kornijcuk V., Jeong D.** Recent Progress in Real-Time Adaptable Digital Neuromorphic Hardware, *Advanced Intelligent Systems*, 2019, vol. 1, article ID 1900030.
5. **Potok T., Schuman C., Young S.** et al. A Study of Complex Deep Learning Networks on High-Performance, Neuromorphic, and Quantum Computers, *ACM Journal on Emerging Technologies in Computing Systems (JETC)*, 2018, vol. 14, no. 2, pp. 1–21.
6. **Petrov A., Alekseeva L., Ivanov A.** et al. Na puti k nejromorfnoy memristornoj komp'uternoy platforme, *Nanoindustrialiya*, 2016, no. 1 (63), pp. 94–109 (in Russian).
7. **Andreeva N. V., Ryndin E. A., Gerasimova M. I.** Memristive logic design of multifunctional spiking neural network with unsupervised learning, *BioNanoScience*, 2020, no. 10, pp. 824–833, <https://doi.org/10.1007/s12668-020-00778-2>.
8. **Bichler O., Querlioz D., Thorpe S. J.** et al. Extraction of temporally correlated features from dynamic sensors with spike-timing-dependent plasticity, *Neural Networks*, 2012, vol. 32, pp. 339–348.
9. **Zhang Y., Wang Zh., Zhu J.** et al. Brain-Inspired Computing with Memristors: Challenges in Devices, Circuits and Systems, *Appl. Phys. Rev.*, 2020, vol. 7, 011308, doi: 10.1063/1.5124027.

10. **Xia Q., Yang J.** Memristive Crossbar Arrays for Brain-Inspired Computing, *Nature Materials*, 2019, no. 18, pp. 309–323.

11. **Pi S., Li C., Jiang H.** et al. Memristor crossbar arrays with 6-nm half-pitch and 2-nm critical dimension, *Nature Nanotechnology*, 2019, no. 14, pp. 35–39.

12. **Goux L., Fantini A., Kar G.** et al. Ultralow sub-500nA operating current high-performance TiN/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/HfO<sub>2</sub>/Hf/TiN bipolar RRAM achieved through understanding-based stack-engineering, *2012 Symposium on VLSI Technology (VLSIT), IEEE, Honolulu, HI, USA*, 2012, pp. 159–160.

13. **McCulloch W. S., Pitts W.** A logical calculus of ideas immanent in nervous activity, *Bulletin of Mathematical Biophysics*, 1943, no. 5, pp. 115–133.

14. **Burkitt A. N.** A Review of the Integrate-and-fire Neuron Model: I. Homogeneous Synaptic Input, *Biological Cybernetics*, 2006, no. 95 (1), pp. 1–19.

15. **Kiselev M. V.** A synaptic plasticity rule providing a unified approach to supervised and unsupervised learning, *Proceedings of IJCNN-2017, Anchorage*, 2017, pp. 3806–3813.

16. **Hebb D. O.** The Organization of Behavior, *New York: Wiley & Sons*, 1949, 335 p.

17. **Ryndin E. A., Andreeva N. V., Luchinin V. V., Goncharov K. S., Raiimzhonov V. S.** Neuromorphic functional modules of spiking neural network, *Nano- i Mikrosistemnaya Tekhnika*, 2021, vol. 23, no. 6, pp. 317–326, doi: 10.17587/nmst.23.317-326 (in Russian).

УДК 621.3.049.779

DOI: 10.17587/nmst.24.303-306

**Н. М. Зарянкин<sup>1,2</sup>**, канд. техн. наук, вед. инж., **Е. С. Кочурина<sup>1,2</sup>**, канд. техн. наук, гл. метролог, e-mail: kochurinaes@gmail.com, **А. И. Виноградов<sup>1,2</sup>**, инж. технолог, **Л. Р. Боев<sup>1,2</sup>**, аспирант, e-mail: leo.boev@mail.ru, **С. А. Анчутин<sup>1,2</sup>**, вед. инж., **А. С. Тимошенко<sup>1,2</sup>**, д-р техн. наук, ген. дир., **С. П. Тимошенко<sup>2</sup>**, д-р техн. наук, директор института НМСТ

<sup>1</sup> Общество с ограниченной ответственностью "Лаборатория Микроприборов", 124527, г. Москва, г. Зеленоград

<sup>2</sup> Национальный исследовательский университет "Московский институт электронной техники", 124498, г. Москва, г. Зеленоград

## РАЗРАБОТКА И ИССЛЕДОВАНИЕ МИКРОМЕХАНИЧЕСКОГО ДАТЧИКА ВРАЩЕНИЯ

Поступила в редакцию 27.04.2022

*Приведено описание разработанной конструкции чувствительного элемента микромеханического датчика вращения, представлены результаты моделирования. Приведены результаты экспериментальных исследований, показывающие работоспособность разработанной конструкции.*

**Ключевые слова:** микромеханический датчик вращения, кремний на изоляторе, метод конечных элементов, МЭМС, результаты экспериментальных исследований

### Введение

Микромеханические датчики вращения применяются для фиксации номинальной перегрузки, действующей параллельно плоскости основания. Благодаря своим достоинствам (малым габаритным размерам и массе, низкому энергопотреблению, высокой ударопрочности и т. д.) датчики можно применять в различных отраслях: транспорт, бытовое применение, промышленное оборудование, специальное назначение и др. Исследование и разработка микромеханических датчиков являются актуальными задачами.

### Описание конструкции и принцип работы

В данной работе представлена оригинальная конструкция микромеханического датчика враще-

ния, изготовленного по технологии кремний-на-изоляторе (SOI) с помощью плазмохимического травления (Bosch-процесс). Датчик вращения представляет собой нормально разомкнутый инерционный ключ, обеспечивающий замыкание контактов при действии перегрузки параллельно плоскости основания. Структура датчика и его принцип работы приведены на рис. 1.

Микромеханический датчик вращения состоит из основания, крышки и чувствительного элемента, включающего инерционную массу, которая подвешена с помощью подвесов к основанию. При воздействии перегрузки вдоль вектора  $A_{ц}$  инерционная масса отклоняется, что приводит к замыканию металлизированных контактов, расположенных на крышке, и на инерционной массе (рис. 1).

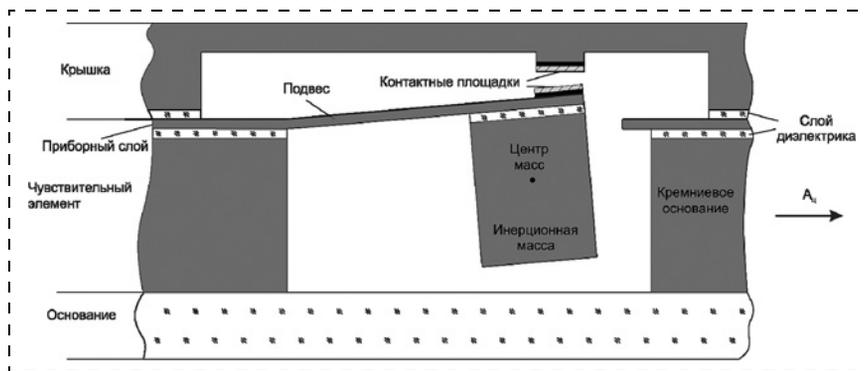


Рис. 1. Структура микромеханического датчика вращения и его принцип работы

Таким образом, замыкается электрическая цепь и датчик срабатывает.

### Моделирование конструкции

После разработки конструкции датчика был проведен расчет конструкции с помощью системы конечно-элементного анализа. Проведенный расчет позволил оценить поведение чувствительного элемента и работоспособность изделия в целом при ударных воздействиях [1, 2]. При проведении моделирования в качестве материала был выбран кремний со следующими характеристиками: плотность —  $2328 \text{ кг/м}^3$ ; коэффициент Пуассона  $0,26$ ; модуль Юнга —  $169 \text{ ГПа}$ .

Проведенный модальный анализ позволил определить собственные частоты разработанной конструкции:  $1260, 2308, 4776, 5565, 62\,926, 120\,650 \text{ Гц}$ . Вторая собственная частота почти в 2 раза превышает значение первой собственной частоты.

В рамках выполнения работы необходимо было разработать конструкцию микромеханического датчика вращения с уровнем срабатывания  $120 \text{ г}$ . На рис. 2 (см. третью сторону обложки) приведены результаты моделирования конструкции. Расчеты показали, что при таком воздействии смещение инерционной массы составляет  $10,7 \text{ мкм}$ , следовательно, крышку необходимо располагать на расстоянии  $10...11 \text{ мкм}$ . Изменяя геометрию подвесов с небольшим изменением разработанного технологического процесса, можно изготовить микромеханический датчик вращения с широким диапазоном уровней срабатывания от  $50$  до  $300 \text{ г}$ .

На рис. 2 (см. третью сторону обложки) указано максимальное смещение инерционной массы при воздействии вращения значением  $120 \text{ г}$ , максимальное напряжение материала при этом составляет  $3,74 \cdot 10^7 \text{ Па}$ , что не превышает предела прочности для кремния  $10^9 \text{ Па}$  [3].

### Результаты проведенных исследований

Чувствительный элемент был изготовлен на базе КНИ-структуры с ориентацией рабочего слоя (111). Использование структуры КНИ позволяет полу-

чать упругие элементы в рабочем слое с заданными параметрами жесткости [4]. В результате выполненных расчетов, проведенного моделирования, разработанного технологического маршрута изготовления получен микромеханический датчик с габаритными размерами:  $3,2 \times 3,2 \times 1,4 \text{ мм}$  (рис. 3).

Исследования изготовленных микромеханических датчиков вращения проводили на центрифуге (рис. 4, см. третью сторону обложки). С помощью специали-

зированной оснастки 2 датчик 1 фиксируется на поворотном столе 3, значение воздействия определяется скоростью вращения центрифуги 4.

На рис. 5 показана упрощенная схема стенда для проведения испытаний.

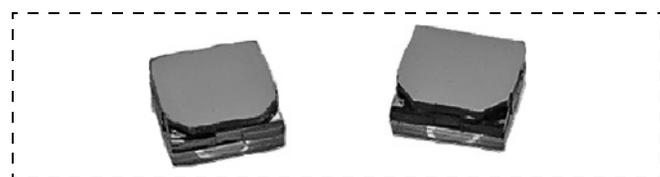


Рис. 3. Фотография микромеханических датчиков вращения [4]

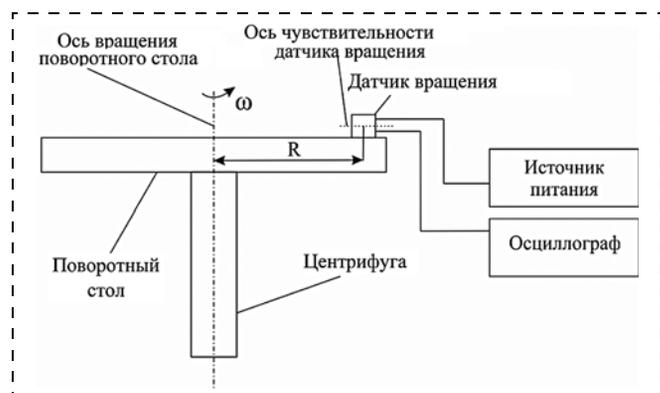


Рис. 5. Упрощенная схема стенда для проведения испытаний датчика вращения

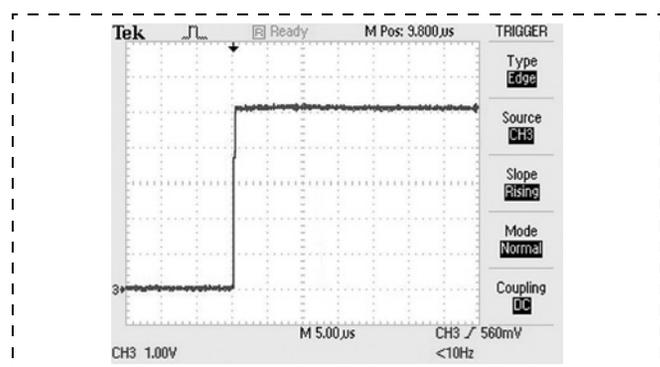


Рис. 6. Типовой сигнал срабатывания датчика вращения при достижении перегрузки

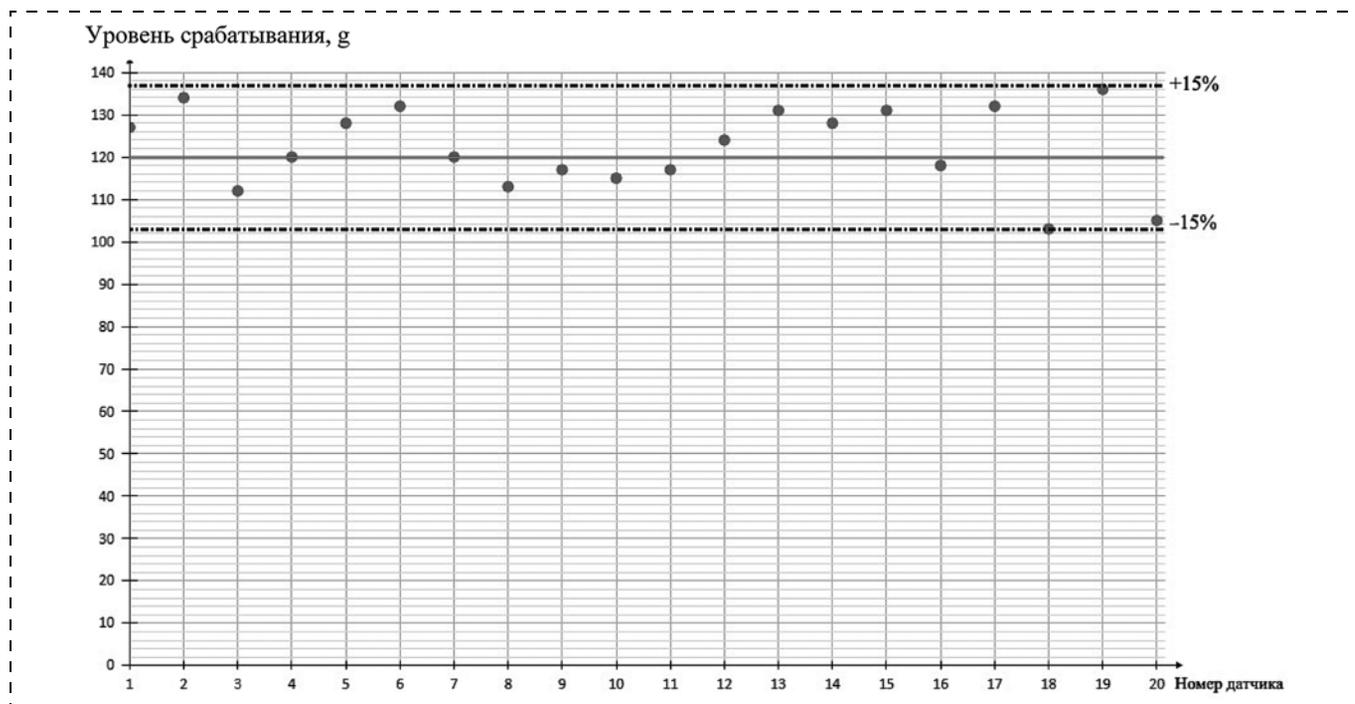


Рис. 7. Результаты измерения уровня срабатывания датчиков вращения

Датчики фиксировали на поворотном столе центрифуги с помощью специально изготовленной оснастки на расстоянии  $R$  от оси вращения центрифуги. Значение воздействия определяется угловой скоростью вращения поворотного стола. Датчики подключают к осциллографу, с помощью которого фиксируется срабатывание датчика. Так как датчик представляет собой нормально разомкнутый ключ, при срабатывании на экране осциллографа происходит резкий скачок напряжения, который говорит о том, что цепь замкнулась (рис. 6). После прекращения воздействия центробежной силы ключ размыкается, данная функция говорит о многократности микромеханического датчика вращения.

В качестве контрольной группы случайным образом было отобрано 20 датчиков. После проведения испытаний данные были записаны. На рис. 7 приведены результаты проведенных исследований. По оси абсцисс указан порядковый номер датчика, по оси ординат — уровень срабатывания.

Проведенный анализ результатов испытаний показал, что из 20 изготовленных датчиков вращения:

- 6 шт. (30 % от общего числа испытываемых датчиков) имеют уровень срабатывания в диапазоне от 114 до 126 g (что составляет 1...5 % от расчетного уровня 120 g);

- 10 шт. (50 % от общего числа испытываемых датчиков) имеют уровень срабатывания в диапазоне от 108 до 132 g (что составляет 5...10 % от расчетного уровня 120 g);

- 4 шт. (20 % от общего числа испытываемых датчиков) имеют уровень срабатывания в диапазоне от 102 до 138 g (что составляет 10...15 % от расчетного уровня 120 g).

По результатам проведенных испытаний видно, что предложенная технология обеспечивает изготовление датчиков с разбросом уровня срабатывания 15 %.

### Заключение

В результате проведенной работы разработана конструкция микромеханического датчика вращения, описан принцип работы. Датчик изготовлен по технологии кремний-на-изоляторе с помощью плазмохимического травления. Приведены результаты моделирования датчика вращения. В ходе расчетов были определены собственные частоты разработанной конструкции, "рабочая" частота составляет 1260 Гц. По результатам статического расчета определено значение смещения инерционной массы — 10,7 мкм при воздействии 120 g, максимальное напряжение материала при этом —  $3,74 \cdot 10^7$  Па.

Разработанный микромеханический датчик вращения имеет следующие параметры:

- уровень срабатывания разработанного датчика вращения составляет 102—138 g;

- габаритные размеры датчика не более  $3,2 \times 3,2 \times 1,4$  мм.

Проведенные исследования показали, что из 20 датчиков 30 % имеют допуск по фиксации уровня срабатывания до 5 %, 50 % имеют допуск по

фиксации уровня срабатывания до 10 %, остальные имеют допуск по фиксации до 15 % от расчетного уровня. Результаты исследования подтверждают работоспособность разработанной конструкции.

### Список литературы

1. Каплун А. Б., Морозов Е. М., Олферова М. А. ANSYS в руках инженера: Практическое руководство. М.: Librokom, 2009. 272 с.

2. Анчутин С. А., Плеханов В. Е., Тимошенко С. П. Введение в конечно-элементный анализ. Использование

ANSYS в задачах математической физики: Уч. пособие. М.: МИЭТ, 2007. 280 с.

3. Blauw M. A., Craciun G., Sloof W. G., French P. J., van der Drift E. Advanced time-multiplexed plasma etching of high aspect ratio silico structures // *J. vac. Sci. technol. B.* 2002. Vol. 20. P. 3106—3110.

4. Кочурин Е. С., Виноградов А. И., Боев Л. Р., Зарянкин Н. М., Анчутин С. А., Тимошенко А. С. Разработка и исследование микромеханического датчика удара // Российский форум "Микроэлектроника-2021", 7-я Научная конференция "Электронная компонентная база и микроэлектронные модули". Сб. тезисов. Крым, г. Алушта, 03—09 октября 2021 г. С. 547—548.

N. M. Zarjankin<sup>1,2</sup>, Ph. D., Lead Engineer of LMD, Lead Engineer of MIET,  
E. S. Kochurina<sup>1,2</sup>, Ph. D., Chief Metrologist., Researcher of MIET, e-mail: kochurinaes@gmail.com,  
A. I. Vinogradov<sup>1,2</sup>, Technology Engineer of LMD, Technology Engineer of MIET,  
L. R. Boev<sup>1,2</sup>, Engineer of LMD, Engineer of MIET, e-mail: leo.boev@mail.ru,  
S. A. Anchutin<sup>1,2</sup>, Lead Engineer of LMD, Lead Engineer of MIET,  
A. S. Timoshenkov<sup>1,2</sup>, Dc. S., CEO of LMD, Professor of MIET,  
S. P. Timoshenkov<sup>2</sup>, Dc. S., Director of the NMST Institute

<sup>1</sup> National Research University of Electronic Technology (MIET), Moscow

<sup>2</sup> Limited Liability Corporation "LMD", Moscow

*Corresponding author:*

Leonid R. Boev, Engineer of LMD, Moscow, leo.boev@mail.ru

## DEVELOPMENT AND RESEARCH OF A MICROMECHANICAL ROTATION SENSOR

*Received on April 27, 2022*

*Accepted on June 02, 2022*

*The description of the developed design of the sensitive element of the micromechanical rotation sensor is given, the simulation results are presented. The results of experimental studies are presented, showing the efficiency of the developed design. As a result of the study of the Bosch process using methods for planning multifactor experiments, the modes of deep etching of silicon were optimized. Prototypes of sensitive element MEMS accelerometers have been produced.*

**Keywords:** micromechanical rotation sensor; silicon on the insulator; finite element method; MEMS; results of experimental studies

*For citation:*

Zarjankin N. M., Kochurina E. S., Vinogradov A. I., Boev L. R., Anchutin S. A., Timoshenkov A. S., Timoshenkov S. P. Development and Research of a Micromechanical Rotation Sensor, *Nano- i Mikrosistemnaya Tekhnika*, 2022, vol. 24, no. 6, pp. 303—306.

DOI: 10.17587/nmst.24.303-306

### Referencrs

1. Каплун А. Б., Морозов Е. М., Олфер'ева М. А. ANSYS в руках инженера: Практическое руководство / Изд. 3-е. Moscow, LIBROKOM, 2009. 272 p. (in Russian).

2. Anchutin S. A., Plekhanov V. E., Timoshenkov S. P. Введение в конечно-элементный анализ. Использование ANSYS в задачах математической физики: Уч. пособие. Moscow, MIET, 2007. 280 p. (in Russian).

3. Blauw M. A., Craciun G., Sloof W. G., French P. J., van der Drift E. Advanced time-multiplexed plasma etching of high aspect ratio silico structures, *J. vac. Sci. Technol. B.*, 2002, vol. 20, pp. 3106—3110.

4. Kochurina E. S., Vinogradov A. I., Boev L. R., Zaryankin N. M., Anchutin S. A., Timoshenkov A. S. Разработка и исследование микромеханического датчика удара, *Russian forum "Microelektronika-2021", 7-ya Science conference "Elektronnaya komponentnaya baza i mikroelektronnye moduli". Collection of abstracts. Crimea, Alushta, 03—09 October 2021*, pp. 547—548 (in Russian).

А. В. Дайнеко, канд. физ.-мат. наук, зам. генерального директора по науке и инновациям, ddd@elparpiezo.ru, **В. Г. Никифоров**, канд. техн. наук, вед. науч. сотрудник, АО "Научно-исследовательский институт "Элпа" с опытным производством", г. Москва, г. Зеленоград, 124460

## ОБЗОР СОСТОЯНИЯ И ПЕРСПЕКТИВ РАЗВИТИЯ И ПРИМЕНЕНИЯ ОТЕЧЕСТВЕННЫХ МНОГОСЛОЙНЫХ ПЬЕЗОАКТЮАТОРОВ ДЛЯ РАКЕТНО-КОСМИЧЕСКОЙ ТЕХНИКИ И НАЗЕМНОЙ КОСМИЧЕСКОЙ ИНФРАСТРУКТУРЫ

Поступила в редакцию 30.06.2022

*Дан обзор состояния разработок и областей применения актюаторов в мире. Описан способ и технология изготовления отечественных многослойных пьезоэлементов методом шликерного литья из пьезоматериала системы ЦТС и многослойных пьезоэлектрических актюаторов на их основе. Отмечено, что по своему техническому уровню многослойные отечественные пьезоизделия соответствуют лучшим зарубежным образцам.*

*Предварительные исследования многослойных пьезоэлектрических изделий в России и за рубежом подтвердили их уникальные возможности при работе в приборах космического приборостроения и наземных структур контроля и управления космическими объектами.*

*Приведены результаты исследований применения многослойных пьезоизделий АО "НИИ "Элпа" и их зарубежных аналогов в системах.*

*Описаны различные варианты конструкций пьезоэлектрических платформ угловых и линейных перемещений с нанометрической точностью. Выбраны оптимальные варианты конструкции на основе специальных многослойных пьезоактюаторов АПМ-1 и АПМ-2 для их применения в приборах ракетно-космической техники и наземной космической инфраструктуры.*

*Разработанная в АО "НИИ "Элпа" технология позволяет создавать перспективные многослойные пьезоизделия различного класса и назначения для приборов ракетно-космической техники и наземной космической инфраструктуры.*

**Ключевые слова:** шликерное литье, многослойный пьезоэлемент, пьезоактюатор, конструкция многослойных приборов для ракетно-космического приборостроения, адаптивная оптика, астрономические и космические антенны, оптико-электронные системы, пьезогенераторы, активное виброгашение, пьезопроводы космических аппаратов, нанопозиционирование, пьезоплатформы

### Введение

В настоящее время основные зарубежные фирмы-производители пьезокерамических пьезоэлементов и пьезоприборов на их основе — это Physik Instrumente GmbH (Германия) [1], Thorlabs (США) [2], CeramTec (Германия) [3], Newport (США) [4] Cedrat Technologies (Франция) [5], Morgan Electric (Англия) [6], NEC Tokin (Япония) [7], выпускающие в основном пьезоизделия и пьезоприборы на основе многослойных тонкопленочных пьезоэлементов, изготовленных по уникальной литьевой технологии. Эта технология позволяет значительно расширить ряд приборов и изделий, которые используются для сложных высокоточных изделий микро- и наносистемной техники. Пониженное напряжение управления позволяет решать задачи обработки сигнала с датчиков и управления прецизионными перемещениями без сложной системы преобразования высокого напряжения, с которой работает монолитная пьезокерамика.

Основные зарубежные и отечественные публикации по пьезоэлектрическим изделиям (пьезоэлементы, датчики, актюаторы и т. д.) связаны с исследованиями и разработкой конструкций на основе многослойных тонкопленочных элементов, изготовленных по литьевой технологии. Рынок таких изделий за рубежом сегодня составляет более одного миллиарда долларов США.

Уникальное сочетание литьевой пьезокерамической и многослойной технологий позволяет автоматически получать многослойные (толщина слоя от 20 до 150 мкм и более) конструкции пьезоизделий низкой себестоимости на автоматизированных линиях.

Малая потребляемая мощность и размеры делают их особенно привлекательными в области МЭМС-технологии, так как схемотехнические процессы близки к микроэлектронным.

Основные разработчики и производители многослойных тонкопленочных пьезоэлементов и изделий на их основе используют для производства

специальные керамические материалы с низкой температурой спекания. Фирмы осуществляют исследования, разработку и выпуск специальных пьезоматериалов только для собственного производства, их химический состав, технология производства являются ноу-хау фирмы изготовителя.

В России на сегодняшний день собственное производство пьезокерамических материалов, вспомогательных компонентов для формирования шликера, и других материалов, необходимых в производстве пьезокерамической пленки, имеет АО "НИИ "Элпа", на котором разработан полный цикл производства отечественных многослойных пьезоэлементов, включая пьезокерамические материалы нескольких типов.

### Основная часть

Как правило, специальный пьезокерамический материал состоит из твердых растворов цирконата-титаната свинца (ЦТС, PZT), модифицированных различными добавками, обеспечивающими низкую температуру спекания до 1000 °С и обладающими высокой однородностью и гомогенностью частиц пьезоматериала.

Автоматизированная высокотехнологическая линия производства шликерного литья тонких пьезокерамических пленок толщиной от 10 до 150 мкм с последующей сборкой многослойных пьезоэлектрических пакетов (рис. 1, см. четвертую сторону обложки) запущена в АО "НИИ "Элпа" в 2009 г. [8]. В АО "НИИ "Элпа" проведены исследования и разработан типоряд специальных пьезокерамических материалов (например, материал ЦТС с низкой температурой спекания 1000 °С и ниже). Разработана уникальная технология изготовления многослойных конструкций пьезоизделий [9]. Созданы приборы измерения основных параметров тонкопленочных многослойных пьезоэлементов и приборов на их основе, а также стендовое испытательное и измерительное оборудование для определения электрофизических параметров пьезоизделий.

В табл. 1 приведен типовой технологический маршрут процесса литьевого изготовления многослойных тонкопленочных пьезоэлементов, изготовленных из специального пьезокерамического материала ЦТС (PZT) с низкой температурой спекания.

### Описание технологии

После изготовления пьезоматериала на артриоре осуществляется его измельчение: основной размер зерна 1 мкм, допускается наличие фракции с размером зерна до 2 мкм. Это позволит снизить температуру спекания до 1000 °С и ниже и обеспечит устойчивость шликера к расслоению.

Приготовление литьевого шликера из пьезокерамики ЦТС с низкой температурой спекания

позволяет использовать в качестве внутренних электродов металлическую пасту, содержащую серебро-палладиевую смесь в соотношении 70/30, и обеспечивает одновременно проведение операции спекания пьезокерамики, вжигания металлизационного сплава.

После помола пьезокерамического материала осуществляют изготовление литьевого шликера, состоящего из монодисперсного пьезокерамического порошка, материала растворителя, пластификатора, связки растворителя и поверхностно-активных добавок, обеспечивающих высокую пластичность и однородность.

Литье шликера через фильеру на движущуюся майларовую ленту и получение "сырых" пьезокерамических пленок (с заданной толщиной), состоящих из порошка пьезокерамического материала и связующих органических добавок, осуществляется на автоматических линиях САМ 220 (изготовитель фирма КЕКО, Словения) при непрерывном контроле заданной толщины пленки в продольном и поперечном сечениях, и в случае отклонения от значения более 2 мкм пленка отбраковывается. Контроль осуществляется в четырех точках с точностью до 1 мкм.

После литья и контроля качества пленки приемную бабину с рулоном сырой пьезокерамической пленки устанавливают в автоматическую линию сборки группового пьезопакета заданной конструкции — установка (фирма КЕКО, Словения), на которой проводят резку сплошных сырых пленок на групповую заготовку заданной конструкции при непрерывном контроле толщины пластин.

Таблица 1

**Технологический маршрут процесса литьевого изготовления многослойного пьезоэлемента из цирконата-титаната свинца**

№ операции	Операции для системы ЦТС
1	Смешивание исходных материалов (PbO + TiO <sub>2</sub> + ZrO <sub>2</sub> + Легирующие добавки)
2	Сушка при <i>t</i> от 0 до 500 °С
3	Измельчение
4	Подготовка суспензии
5	Изготовление шликера
6	Литье пленки
7	Контроль качества пленки
8	Резка пленки на пластины
9	Контроль качества пластин
10	Металлизация пластин, сборка в пакет
11	Прессование заготовок
12	Вырубка многослойных пьезоэлементов
13	Утильный обжиг
14	Высокотемпературное спекание при <i>t</i> ≤ 1000 °С
15	Шлифовка
16	Формирование внешних электродов
17	Контроль емкости tgδ
18	Поляризация
19	Измерение электрофизических параметров

После резки на пластины с помощью трафарета наносят внутренние электроды с заданной конфигурацией (толщина слоя 1...3 мкм) Внутренний электрод не имеет выводов с трех сторон. Материал электродов (серебро-палладиевый сплав) в соотношении 70/30 с добавкой пьезокерамического материала, обеспечивающего согласование КТР керамики и сплава, что повышает адгезию и надежность.

На линии осуществляется сборка групповых заготовок по заданной программе в *n*-слойные пленки. На установке проводится последовательное наложение пластин друг на друга.

Последующее гидростатическое прессование собранных пакетов осуществляется в гидростатическом прессе ILS-GA при давлении 2 МПа.

Полученные пакеты передаются на установку вырубки на автомат СЛС + 4A1 (фирмы КЕКО Словения), где по заданной программе осуществляется вырубка пьезозаготовок с заданной геометрией.

После контроля и разбраковки пьезозаготовки подвергают утильному обжигу. Удаление связки и спекание заготовок в монолит проводят в установках утильного обжига (сушильные блоки) при температуре 300 °С для удаления органических соединений и растворителей.

Затем пьезозаготовки поступают на установку СЭМЗ, где осуществляется высокотемпературное спекание внутренних электродов при температуре до 1000 °С.

После спекания осуществляют шлифовку пьезозаготовок, обеспечивающих плоскопараллельность поверхности  $\pm 0,1$  мкм, и вскрытие контактов внутренних электродов.

Металлизацию боковых поверхностей пьезозаготовок для пайки токоподводов проводят вручную при размещении пьезозаготовок в специальных приспособлениях. Нанесение внешних электродов на лицевую поверхность выполняют кисточкой с последующим вжиганием при температуре не выше 250 °С.

После нанесения внешних электродов осуществляют контроль емкости и тангенса угла диэлектрических потерь.

Поляризацию пьезоэлектрических многослойных пьезоэлементов проводят на установке поляризации при температуре 60 °С и напряжении электрического поля  $E = 2$  кВ/мм.

После поляризации проверяют основные электрофизические параметры многослойных пьезоэлементов:

- перемещение при номинальном значении управляющего напряжения;
- статическую емкость;
- сопротивление изоляции.

В АО "НИИ "Элпа" создан базовый ряд унифицированных многослойных монолитно пленочных пьезоэлементов [9]. Этот типоряд включает в себя более 40 типоразмеров. На основе этих пьезоэлементов разработан типоряд унифицированных пьезоактюаторов и пьезоприборов на их основе. Разработанные в АО "НИИ "Элпа" многослойные пьезоэлектрические изделия, могут быть использованы при проектировании и изготовлении приборов космического приборостроения в системах контроля и навигации наземных систем для космических объектов.

Конструкция многослойных тонкопленочных пьезоактюаторов и преобразователей состоит из сборки с помощью клеевого соединения многослойных тонкопленочных пьезоэлементов (рис. 2, см. четвертую сторону обложки) в пакет. В зависимости от требований к конструкции изделия определяют требования к многослойному пьезоэлементу (габаритные размеры, толщина и число пьезослоев, электрофизические параметры).

В табл. 2 представлен типовой технологический маршрут изготовления многослойных пьезоактюаторов на основе многослойных тонкопленочных пьезоэлементов [9].

На рабочем месте измерения электрофизических параметров пьезоактюатора осуществляется

Таблица 2

**Маршрутная технология изготовления многослойного пьезоактюатора**

№ операции	Содержание операции
1	Входной контроль параметров многослойного тонкопленочного пьезоэлемента: внешний вид, измерение электрофизических параметров
2	Сборка с помощью клеевых соединений пьезоэлементов в пьезопакет
3	Установка с помощью клеевых соединений на торцах пьезопакета наконечников и пят для последующей установки в корпусе
4	Установка с помощью клеевых соединений для изделий с обратной связью датчиков положения
5	Пайка токоподводов пьезопакета и датчик положения
6	Контроль параметров: <ul style="list-style-type: none"> <li>• пьезопакета: емкость, сопротивление изоляции, амплитуда перемещения при номинальном напряжении;</li> <li>• датчика положения: сопротивление изоляции</li> </ul>
7	Предварительные испытания: <ul style="list-style-type: none"> <li>• термоциклирование;</li> <li>• электротренировка</li> </ul>
8	Установка пьезопакета в герметичную оболочку, измерение основных электрофизических параметров
9	Герметизация пьезоактюатора
10	Измерение основных электрофизических параметров многослойных тонкопленочных пьезоактюаторов

входной контроль параметров многослойных тонкопленочных пьезоэлементов:

- внешний вид, габаритно-присоединительные параметры;
- электрофизические параметры: перемещение при номинальном значении управляющего напряжения, статическая емкость, сопротивление изоляции.

Сборку многослойных пьезоэлементов в пакет выполняют на монтажном столе СМ4.

Перед сборкой многослойные пьезоэлементы промывают этиловым спиртом с помощью кисточки и выдерживают на воздухе в течение 20 мин. После сушки на многослойные пьезоэлементы шпателем наносят тонкий слой клея ЭК-2 (или К400).

Многослойные пьезоэлементы устанавливают в приспособления для склеивания и набирают пакет из заданного числа пьезоэлементов.

После установки пьезоэлементов с помощью механизма нагружения на пакет воздействуют с усилием до 10 кг.

Для бескорпусных многослойных пьезоактюаторов на корпус пьезопакета с помощью клеевого соединения устанавливают пассивные слои пьезокерамики (неполяризованные) для последующей их подшлифовки, обеспечивающей плоскопараллельность с точностью  $\pm 0,01$  мкм.

Для корпусных многослойных пьезоактюаторов с помощью клеевого соединения на корпус пьезопакета устанавливают наконечник и пята, выполненные из безмагнитной нержавеющей стали типа 42 НХТЮ для последующего монтажа в корпус.

Для многослойных пьезоактюаторов с обратной связью с помощью клеевого соединения на боковую поверхность пьезопакета устанавливают тензодатчик типа KSN-6-380-E4-11, KF6-120C1-11N30C или его аналог.

Опыт эксплуатации различных типов пьезоизделий, в том числе многослойных пьезоактюаторов, показал, что по клеевому соединению отказов не было.

Пайку токоподводов (провод МС16-13008) пьезопакета и тензорезистора выполняли на монтажном столе СМ-4 с помощью паяльной станции АТР 1101. Пайку осуществляли припоем ПСр ОС-2,5-58, флюс ФКСП при температуре  $240 \pm 10$  °С в течение 3 с.

После пайки на специальном рабочем месте проводили контроль электрофизических параметров:

- для пьезопакета: амплитуды перемещения при номинальном значении управляющего напряжения; емкости и сопротивления изоляции;
- для тензорезистора сопротивление изоляции;
- для отбраковки пьезоизделий и выявления возможных отказов при эксплуатации проводят предварительные испытания.

Электротренировка при установке изделия в специальном испытательном стенде:

- при подаче на изделие напряженности электрического поля  $E = V/\Delta = 2$  кВ/мм (где  $V$  — значение напряжения на пьезоактюаторе;  $\Delta$  — толщина пленки, мм);
- частота следования импульсов 50 Гц;
- число циклов 200 000.

Для специальных многослойных пьезоактюаторов, работающих в жестких условиях, по требованию Заказчика проводят термоциклирование:

- 15 мин изделие выдерживают при температуре +85 °С;
- 1 мин — при температуре +20 °С;
- 15 мин — при температуре -65 °С;
- число циклов — 5.

Для 5 % от партии пьезоизделий выполняют измерение и отбраковку прочности на изгиб при приложении в течение 20 с усилия нагрузки  $F/S \geq 100$  Н/см<sup>2</sup>.

Герметизация многослойных пьезоактюаторов:

- для бескорпусных многослойных пьезоактюаторов: трехкратное нанесение на поверхность пьезоактюатора лака УР 231 и с интервалом 3—4 ч просушивания при комнатной температуре в течение 24 ч; при необходимости помещают пьезоактюатор в защитную термоусадочную трубку F 32-10 при температуре 120 °С;
- корпусные многослойные пьезоактюаторы размещают в корпусе, изготовленном из материала НПВХ или безмагнитного сплава.

Герметизация в корпусе компаундом СИЭЛ-155-322 обеспечивает надежную защиту от влаги и повышает механическую стойкость с уровнем поджатия до 5 Н.

В АО "НИИ "Элпа" разработаны конструкция и технология изготовления типоряда специальных пьезоактюаторов повышенной надежности (рис. 3). Пьезоактюатор размещен в герметичной прозрачной оболочке толщиной 1...1,5 мм, выполненной из специального прозрачного высокотемпературного полимера. Этот актюатор обладает повышен-

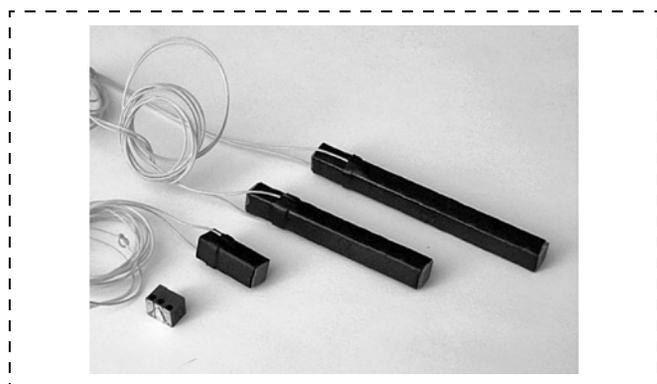
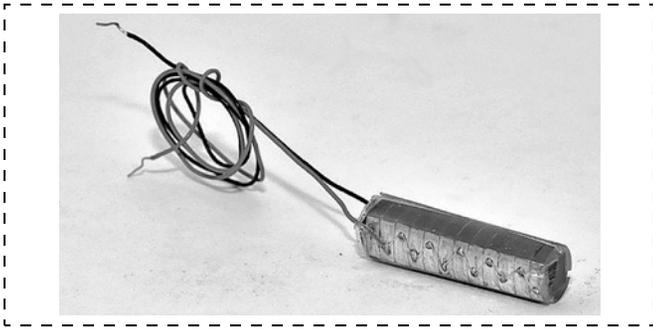


Рис. 3. Актюаторы



**Рис. 4. Актюатор в высокотемпературном полимере**

ной механической прочностью (в 2—3 раза выше, чем стандартные) и 100 %-ной влагоустойчивостью при сохранении основных электрофизических параметров. Габаритные и присоединительные размеры специального пьезоактюатора незначительно отличаются от аналога, и при небольшой доработке конструкции актюатор можно использовать путем прямой замены. Применение специальных актюаторов в приборах повышает надежность и механико-климатическую стойкость (рис. 4).

После герметизации многослойных пьезоэлектрических актюаторов проводят измерение и контроль основных электрофизических параметров:

- перемещения при номинальном значении управляющего напряжения с погрешностью  $\pm 1\%$ ;
- статической емкости с погрешностью  $\pm 5\%$ ;
- сопротивления изоляции с точностью  $\pm 5\%$ ;
- резонансной частоты с точностью  $\pm 5\%$ .

В последние годы в России два предприятия — АО "Концерн "Океанприбор" [10] и АО "НИИФИ" [11] провели модернизацию технологии производства пьезоэлементов и приобрели технологические линии тонкопленочного шликерного литья пьезокерамической пленки толщиной 10...150 мкм.

Основными направлениями деятельности АО "Концерн "Океанприбор" являются разработка и производство гидроакустической техники для Военно-морского флота [10].

В АО "Концерн "Океанприбор" вновь созданная лаборатория перспективных пьезоматериалов и гидроакустических изделий на их основе совместно с Фондом перспективных исследований реализует проект по созданию новых высокоэффективных пьезоэлектрических материалов и приборов на их основе для перспективных систем ВМФ России.

Разработку наукоемких пьезоизделий проводят по трем основным направлениям:

- разработка пьезоэлементов и гидроприборов на их основе на базе новых пьезокомпозиатов;
- разработка пьезоэлементов и гидроакустических приборов и систем на основе новой перспективной пьезокерамики (с оптимизацией состава и возможностью исключения свинцовосодержащих добавок);

- разработка низкотемпературных пьезоматериалов для изготовления многослойных тонкопленочных пьезоэлементов.

Организация промышленного производства многослойных тонкопленочных пьезоэлементов в АО "Концерн "Океанприбор" осуществляется на Таганрогском заводе "Прибой" (входит в структуру АО "Концерн "Океанприбор"), где в настоящее время проходит наладка технологической линии по производству многослойных пьезоэлементов по литьевой технологии. Автоматизированная линия изготовления многослойных тонкопленочных пьезоэлементов собрана из технологического оборудования КЕКО Equipment производства Словении.

Оптимизация технологии изготовления специальных пьезокерамических материалов на основе нано- и ультрадисперсионных пьезокерамических порошков систем ЦТС осуществлена под научным руководством специалистов и ученых НКТБ "Пьезоприбор" ЮФУ (г. Таганрог) [12]. С их участием осуществлялось внедрение технологии производства многослойных тонкопленочных элементов.

Новое подразделение завода "Прибой" призвано прежде всего удовлетворить потребности в перспективных многослойных пьезоэлементах для изделий АО "Концерн "Океанприбор": — гидроакустических средств подводного наблюдения противодействия, гидроакустической связи и навигации.

Производительность технологической линии изготовления многослойных пленочных пьезоэлементов до 1 млн штук пьезоэлементов в год.

Акционерное общество "Научно-исследовательский институт физических измерений" (АО "НИИФИ") [11], входящее в холдинг "Российские космические системы", — это ведущее предприятие по разработке и производству датчиков, преобразующей аппаратуры, систем измерения диагностики, управления для ракетно-космической техники. Основные направления деятельности — разработка, изготовление и поставка различного класса и назначения нормализующих преобразованием систем измерения, диагностики, контроля и управления аварийного запуска для ракетно-космической техники и стартовых наземных сооружений.

В АО "НИИФИ" создано и функционирует современное производство пьезоизделий — датчиков и преобразователей.

В последние два года осуществлена модернизация производства пьезоэлементов и датчиков на их основе. Внедрена литьевая технология производства многослойных тонкопленочных пьезоэлементов из специально разработанных пьезоматериалов. Созданная технология ориентирована на исследование и разработку современных и перспективных датчиков и преобразователей, промышленное внедрение унифицированных пьезоэлектрических датчиков и преобразователей раз-

личного назначения для аэрокосмического приборостроения.

Линия использует комплекс технологического оборудования фирмы КЕКО (изготовитель Словения).

По своему техническому уровню выпускаемые АО "НИИФИ" пьезоизделия соответствуют лучшим отечественным аналогам.

Производственные мощности технологической линии позволяют в год выпустить до одного миллиона различного типа многослойных пьезоэлементов.

Основные электрофизические параметры пьезоизделий определяются, кроме различных вариантов конструкций, технологией изготовления и параметрами применяемых пьезокерамических материалов.

В табл. 3 приведены основные параметры специально разработанных пьезокерамических материалов с температурой спекания до 1100 °С и ниже, предназначенных для изготовления пьезоэлементов по литьевой технологии [1, 2, 6, 8, 11].

Из анализа материалов следует, что параметры специального пьезоэлектрического материала для изготовления многослойных пленочных пьезоэлементов, производимых за рубежом, сопоставимы с параметрами отечественных пьезоматериалов АО "НИИ "Элпа" и незначительно отличаются от характеристик пьезокерамических материалов АО "НИИФИ".

Основные преимущества многослойных тонкопленочных пьезоэлементов и пьезоэлектрических приборов на их основе [1, 3, 5, 8, 9, 13]:

— легко формируются в сложные конструкции различных изделий с большой площадью при минимальных затратах;

— создают движение в субнанометровом диапазоне, так как нет движущих деталей при контакте друг с другом;

— в реальных условиях применения с учетом линейной зависимости перемещения от управления тонкопленочные пьезокерамические многослойные пьезоактюаторы имеют предельное разрешение, связанное с электронными шумами источников питания и датчиков состояния обратной линии связи, на уровне менее 1 нм;

— тонкие пьезокерамические слои позволяют получать большие перемещения при низких значениях управляющих напряжений от +12 до +150 В;

— в статическом режиме работы удержание груза в течение длительного периода времени не потребляет энергию;

— высокое быстродействие от 1 мс до 100 мкс в частотном диапазоне от 100 Гц и более;

— не создают магнитных полей и не реагируют на них;

— надежно работают в жестких условиях эксплуатации при изменении температуры окружающей среды от 150 °С и более до минусовых значений, близких к значениям абсолютного нуля.

Фирма Attocube System AG выпускает малогабаритные пьезоэлектрические платформы ANSIS, где в качестве привода используются многослойные пьезоактюаторы, обеспечивающие работу в диапазоне температур от 4 до 400 К.

Таблица 3

Основные электрофизические параметры пьезоматериалов для изготовления тонкопленочных пьезоэлементов по литьевой технологии

Основные электрофизические параметры пьезоматериала. Ед. измерения	Physik Instrumente GmbH (Германия)		CeramTec (Германия)		Morgan Electric (Англия)			АО "НИИ "Элпа" (Россия)			АО "НИИФИ" (Россия)			
	Тип пьезоматериала													
	PIC 151	PIC 153	PIC 252/255	Somix P505	Somix P53	PZT5A3	PZT5Hj	PZT5A4	ЦТС-46	ЦТС-50	НЦТС-2	НФИ-50	НФИ-51	НФИ-83
Температура Кюри $T_K$ , °С	250	340	345	335	215	350	195	360	260	260	230	320	230	350
Относительная диэлектрическая проницаемость, $\epsilon/\epsilon_0$ , от. ед.	2400	4200	1450	1800	3800	1800	3500	1500	2100	2200	4500	1750	3000	1400
Тангенс угла диэлектрических потерь, $\text{tg}\delta$ , не более, от. ед.	0,02	0,03	0,02	0,015	0,016	0,014	0,02	0,021	0,02	0,025	0,03	0,005	0,028	0,025
Пьезомодуль, $d_{33}$ , пКл/Н	500	600	360	475	580	425	630	460	500	650	800	450	600	300
Плотность, $\rho$ , г/см <sup>3</sup>	7,8	7,6	7,7	7,7	1,8	7,9	7,4	7,9	7,6	7,6	7,8	7,6	7,3	7,4
Механическая добротность, $Q_M$ , от. ед.	100	80	50	80	75	90	65	80	70	80	60	80	70	120

Стандартный многослойный пьезоактюатор фирмы Cedrat Technologies был испытан в жидком азоте  $t = 77$  К и обеспечил работу при снижении электрофизических параметров перемещения на треть от значения, получаемого при комнатной температуре.

Пьезоактюаторы работоспособны при температуре окружающей среды, близкой к абсолютному нулю, но должна быть модернизирована конструкция и применены специальные материалы (манганиновые токоподводы, покрытые специальным полиамидом).

Многослойный актюатор АПМ-60/20 ( $\varnothing 60 \times \varnothing 20 \times 26$  мм) фирмы АО "НИИ "Элпа", разработанный для авиакосмических систем гашения вибрации крупногабаритных объектов развивается при управляющем напряжении 500 В и перемещении 5 мкм усилие свыше 50 кН. Этот актюатор обладает высокой стойкостью к ударным нагрузкам до 2000 г и более.

Специально разработанные в АО "НИИ "Элпа" балочные вибрационные гироскопы БВГ-1 и БВГ-2, где в качестве датчиков угловых скоростей используются пьезоэлементы, обеспечивают эксплуатацию в аппаратуре дистанционного зондирования Земля Аркон при ударных нагрузках 25 000 и 10 000 г соответственно.

Твердотельная конструкция обеспечивает надежную работу гироскопов в условиях сверхвысокого вакуума до  $10^{-5} \dots 10^{-7}$  пПа.

Пьезоактюаторы не имеют движущихся частей, таких как зубчатые колеса, и поэтому обладают повышенной долговечностью. Срок службы составляет  $10^{10}$  импульсов и более.

Проведенные в Cedrat Technologies [5] непрерывные шестимесячные испытания многослойных пьезоактюаторов APL 200 M при напряжении постоянного тока +150 В с частотой 600 Гц показали способность их работы в течении  $10^{10}$  циклов.

Проведенные в АО "НИИ "Элпа" [8] в течение 3 лет испытания на долговечность многослойных пьезоактюаторов АПМ-2-15 при температуре окружающей среды +85 °С и напряжении постоянного тока +100 В с частотой 50 Гц показали, что в течение длительных циклов испытаний, до  $5 \cdot 10^9$  импульсов, их электрофизические параметры — перемещение, статическая емкость, сопротивление изоляции изменяются незначительно и после наработки изменения составляют 3...5 %, также актюаторы обладают повышенной радиационной стойкостью.

Многослойные пьезоактюаторы и пьезоплатформы, которые производит АО "НИИ "Элпа", прошли экспериментальную проверку на соответствие стойкости уровню 6Ус к воздействию факторов с характеристиками 7И<sub>1</sub>, 7И<sub>7</sub>. Экспериментально подтверждена стойкость пьезоизделий к воздействию факторов 7К с характеристиками 7К<sub>1</sub>, 7К<sub>4</sub> вплоть до уровня 1К.

Уникальные параметры пьезоэлектрических изделий, выполненных из многослойных пьезоэлементов, изготовленных методом шликерного литья, показывают перспективность их применения в аэрокосмическом приборостроении.

Зарубежные публикации в открытой печати об исследованиях и разработке пьезоизделий для аэрокосмической области приборостроения имеют ограниченный характер, что связано с ноу-хау и секретностью информации. В основном приводятся данные описательного характера без уточнения эксплуатационных и технических параметров.

В работе сотрудников НИИФИ [14] сообщается, что датчики и актюаторы, изготовленные из многослойных пленочных пьезоэлементов (толщина пленки марки ЦТС от 10 до 160 мкм), выполненных методом шликерного литья, обладают рядом следующих преимуществ: меньшей массой, большей гибкостью и эластичностью, широким диапазоном частот, низким акустическим импедансом, высокочувствительной механической ударопрочностью, возможностью автоматического изготовления пьезоизделий сложной формы с большой рабочей поверхностью и низкой себестоимостью, и их применение перспективно в системах управления объектов ракетно-космической техники и наземной космической инфраструктуры.

Последние разработки АО "НИИ "Элпа" по созданию и исследованию многослойных пьезоизделий показывают перспективность применения их в аэродинамическом приборостроении.

В настоящее время приказом № 397 от 24 декабря 2021 года Госкорпорации "Роскосмос" переоформлена лицензия № 584, выданная АО "НИИ "Элпа" на осуществление космической деятельности в части изделий электронной компонентной базы электро- и радиоизделий для ракетно-космической техники:

- разработка изделий ракетно-космической техники;
- изготовление изделий ракетно-космической техники;
- испытания ракетно-космической техники.

Научно-технический задел АО "НИИ "Элпа", полученный в ходе разработки и изготовления многослойных пьезоэлементов методом литевой технологии и пьезоизделий на их основе, позволяет обеспечить создание перспективных и высокоэффективных приборов для аэрокосмического приборостроения.

АО "НИИ "Элпа" разработала и поставила для дистанционного космического газоанализатора (разработка АО "ГосНИИхиманалит", г. Санкт-Петербург) специальные многослойные пьезоактюаторы типа АМП1-15М ( $5 \times 6 \times 40$  мм), обеспечивающие подстройку интерферометра с нанометрической точностью, что позволило повысить раз-

решение космического газоанализатора до уровня 1 ppm и менее.

Применение многослойных пьезоактюаторов в лазерно-оптических системах целенавещения обеспечивает автоматическую юстировку и подстройку оптических устройств, позволяющих повысить быстродействие в 2—5 раз, точность определения координат цели до 2 раз, снижение массогабаритных параметров в 3 раза.

В АО "НИИ "Элпа" по заказу МО РФ разработаны специальные многослойные миниатюрные пьезоактюаторы АПМ10/10 для управления оптико-электронными лазерными системами.

В перспективных разработках лазерных систем дальнометрии и подсветки использование миниатюрных многослойных пьезоактюаторов типа АПМ 10/10 в системах НПВО изделий Красногорского завода им С. А. Зверева позволили увеличить контрастность, повысить уровень помехозащищенности, увеличить дальность обнаружения цели в 1,5—2 раза.

NASA использует аналогичные малогабаритные многослойные пьезоактюаторы в системах точного лазерного наведения и стыковки различного класса космических аппаратов.

В АО "НИИ "Элпа" разработан макетный образец пьезокерамической вибрационной головки для вибробура грунтозаборного устройства космического аппарата Фобос-грунт по договору с ФГУП НПО имени С. А. Лавочкина и Института прикладных теоретических исследований.

Вибрационная пьезокерамическая головка является аналогом ультразвуковой головки бурильщика для отбора проб, разработанного для марсоходов Спирит и "Оппортьюнити" NASA [15, 16].

Примером перспективного и эффективного применения многослойных пьезоэлектрических актюаторов фирмы АО "НИИ "Элпа" является их использование в современных адаптивных системах управления многоэлементным деформирующим зеркалом в мощных лазерных установках [18] и многослойного пьезоэлектрического актюатора типа МПП-6×6×20 вместо ранее применяемого пакетного преобразователя типа ППУ-2 в лазерных установках термоядерного синтеза УФМ, что обеспечивает заданное значение деформации при снижении габаритных размеров в 30 раз, массы в 40 раз, управляющего напряжения в 3 и более раз, быстродействие увеличивается в 6 раз.

НИИ НПО "Луч" — разработчик адаптивных оптических систем различного класса и назначения использует в системах контроля и управления многослойные пьезоэлектрические актюаторы типа АПМ-2, изготовленные в АО "НИИ "Элпа".

За рубежом адаптивные оптические системы с нанометрическим разрешением эффективно применяют в системах управления наземными кос-

мическими и аэрокосмическими антеннами, в лазерных и радиолокационных станциях. Актюаторы обеспечивают автоматизацию процессов во времени и пространстве с уменьшением массогабаритных параметров в 3—5 раз, снижение энергопотребления в 3—5 раз и более, с одновременным повышением разрешения и быстродействия.

Перспективно применение многослойных пьезоактюаторов в системах активной стабилизации сектора астрономических и спутниковых антенн с нанометрической точностью и быстродействием не менее 1 мкс [18].

Например:

- По заказу Швейцарского центра электроники и микротехнологии и NTE фирма Cedrat Technologies разработала специальные многослойные пьезоактюаторы типа АРА 500XXL для нанопозиционирования и стабилизации зеркал М5 космического проекта ESO. Привод зеркала телескопа  $2,4 \times 3$  м с помощью пьезопроводов на основе многослойных пьезоактюаторов типа АРА 500XL обеспечивает ход 500 мкм с разрешением 5 нм, ширина полосы 100 Гц, блокирующая сила 20 кН обеспечивает линейное движение и боковые наклоны с нанометрической точностью [15].
- Фирма Physik Instrumente [1] для космических систем Mars марсохода Rovers Curiosity NASA изготовила и поставила типоряд многослойных пьезоактюаторов и пьезоплатформ, а также для юстировки с нанометрической точностью секционного зеркала антенны Европейской лаборатории ESP (поставила антенны диаметром 39 м) и зеркала телескопа ALMA в Чили (64 сектора).
- Для астрономической лаборатории (г. Марсель, Франция) разработаны и поставлены многослойные пьезоактюаторы АРА 230 (фирма-изготовитель Cedrat Technologies) [5], обеспечивающие прямое перемещение и боковое движение при деформации зеркала с нанометрической точностью (диаметр зеркальной антенны ESP телескопа 35 м).

Для управления движением космической антенны с нанометрической точностью АО "НИИ "Элпа" разработала и поставила в научно-исследовательский институт точных приборов (НИИТП) спутниковые многослойные специальные пьезоактюаторы АПМ 1—16 ( $5 \times 6 \times 40$  мм).

Перспективным направлением применения для космической аппаратуры являются разработки пьезоэлектрических систем управления антеннами различного назначения, включая управление зеркалами систем лазерно-радиолокационных комплексов, систем направленной энергии (СВЧ и другими энергиями).

Фирма Cedrat Technologies для космического инструмента Miclas космической миссии Rosetta

разработала и поставила по контракту ESAL ESTER многослойные пьезоэлектрические актюаторы APA 50S и APA 10 и сборки для механизма сканирования с нанометрической точностью атомного силового микроскопа CAFN, функционал этого механизма должен обеспечивать сканирующие движения с нанометрическим разрешением зонда в атомном силовом микроскопе (ASM) при жестких режимах эксплуатации в космосе. Механизм заработал в составе ASM на комете Гурюмов—Герасименко после десятилетнего полета в космосе [5].

В обзоре, посвященном 30-летию создания пьезоактюаторов [19], одним из основных перспективных направлений упоминается создание на их основе пьезогенераторов, которые преобразуют механическую и вибрационную энергию в электрическую для обеспечения автономных накопительных систем питания. Потенциальные преимущества:

- длительный срок службы, сбор энергии может длиться так же долго, как и источник механических колебаний и вибрации;
- источник автономного питания на базе пьезогенератора исключает применение традиционных батарей;
- не нуждается в технической поддержке и постоянном техническом обеспечении, так как не требует замен;
- низкое влияние окружающей среды, работает в широком диапазоне температур.

Для пьезопреобразователей механической энергии в электрическую существуют два типа пьезогенераторов:

- на изгибных многослойных пьезоэлементах (пьезобиморфы);
- на многослойных осевых пьезоактюаторах.

За рубежом основные публикации по исследованию и разработке малогабаритных пьезогенераторов, преобразующих механическую энергию вибрации в электрическую энергию, на основе изгибных многослойных пьезоактюаторов [9, 20].

В настоящее время интенсивно ведутся работы по созданию информационно-измерительных и управляющих систем, способных принимать и идентифицировать электромагнитные сигналы от беспроводных микромошных датчиков, встроенных в различные конструкции сетей передачи информации, расположенные в любых, в том числе и труднодоступных, местах, где возможности централизованного питания ограничены. Большое число элементов в таких информационных беспроводных сетях практически исключает возможность длительного, многолетнего поддержания их работоспособности путем регулярной или выборочной замены источника питания. Достижения в области создания маломощных СБИС наряду с низкими коэффициентами заполнения беспроводных дат-

чиков уменьшают требования к питанию до диапазона десятков и сотен микроватт. Связанная с этим низкая потребляемая мощность открывает возможность обеспечения питанием сенсорных узлов посредством извлечения энергии из окружающей среды, устраняя необходимость в батареях и увеличивая срок службы до бесконечности.

Публикации по созданию пьезоэлектрических генераторов на основе многослойных пьезогенераторов осевого типа ограничены. Учитывая низкую механико-климатическую стойкость и низкую надежность при работе в жестких условиях эксплуатации изгибных пьезогенераторов на основе многослойных биморфных конструкций, их возможности применения в аппаратуре ракетно-космической отрасли очень ограничены.

В АО "НИИ "Элпа" был проведен цикл исследований по возможности создания на основе многослойных пьезоактюаторов осевого типа пьезогенераторов, работающих в жестких условиях эксплуатации.

В работе проведены исследования и определены предельные параметры многослойных пьезоэлектрических генераторов на основе многослойных пьезоактюаторов [9, 21].

Основные ограничения по применению пьезо-керамических генераторов в системах преобразования механической энергии деформации сжатия-растяжения связаны с предельными параметрами пьезокерамики: в пределах прочности пьезокерамики на растяжение и сжатие —  $T_{33} < 10^8 \text{ Н/м}^2$ , а для многослойных структур — ограничением электрической прочности  $V/\Delta \leq 2 \cdot 10^6 \text{ В/м}$ , при котором обеспечивается долговечность пьезоизделий в частотном диапазоне напряжения до 100 Гц с более чем  $2 \cdot 10^9$  импульсов.

С учетом этих ограничений на основании расчетных данных в АО "НИИ "Элпа" был разработан типовой модуль автоматического пьезоэлектрического генератора (рис. 5) на базе ленточных пьезоактюаторов, преобразующих механическую энергию давления от  $10^6$  до  $10^8 \text{ Н/м}^2$  в электрическую энергию [9, 22].

Основные элементы конструкции: 1 — основание  $84 \times 65 \times 5 \text{ мм}$ ; 2 — рамка  $84-65 \times 68-55 \times 17,5 \text{ мм}$ ; 3 — пята  $55 \times 55 \times 10 \text{ мм}$ , материал сталь 45; 4 — изолятор  $54 \times 54 \times 3 \text{ мм}$ ; 5 — пьезоэлектрический преобразователь; 6—9 — крепежные винты.

Модульная конструкция пьезогенератора позволяет под конкретные задачи автономного обеспечения электроэнергией собирать генераторы в линейку, что обеспечивает простоту установки и монтажа в полотно автомобильной и железной дорог (включая метрополитен).

Генератор ГН-1 (рис. 6, см. четвертую сторону обложки) собран из 12 многослойных пьезоэлек-

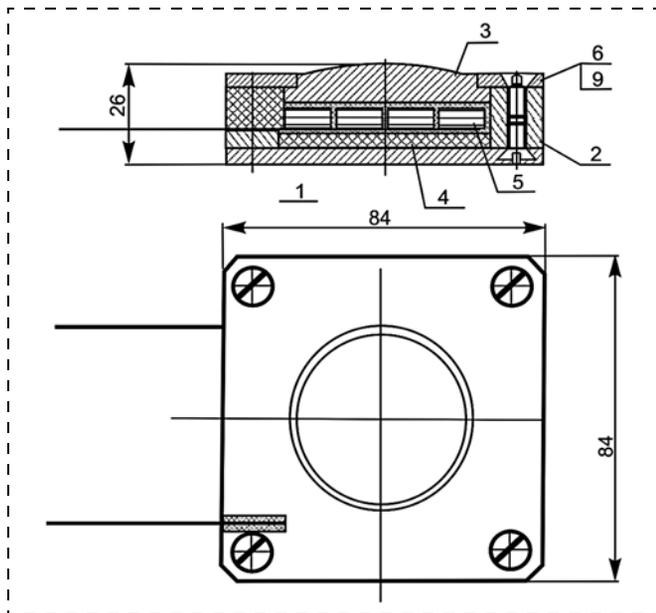


Рис. 5. Конструкция модуля многослойного пьезоэлектрического генератора



Рис. 7. Биморф

трических блоков с размерами  $12 \times 15 \times 10$  мм, многослойного пьезоэлектрического генератора сжатия из 32 многослойных пленочных пьезоэлементов (толщина пленки 80 мкм), соединенных между собой механически последовательно, а электрически параллельно. Измерение электрофизических параметров ГН-1 проводили на установке, обеспечивающей плавную подачу давления в диапазоне измерений — от  $10^5$  до  $5 \cdot 10^7$  Н/м<sup>2</sup> со скоростью  $10^6$  Н/м<sup>2</sup>/с.

Время снятия давления — не более 0,1 с.

Результаты исследований прочности значений приведены в табл. 4 для давлений  $5 \cdot 10^7$  Н/м<sup>2</sup> при одном цикле нагрузки.

Поскольку пьезоэлектрический генератор производит за один цикл относительно малое количество электрической энергии, используют систему накопления и хранения энергии.

Как показывают расчеты, при прохождении за один час одного железнодорожного состава, состоящего из 50 вагонов (при давлении одного колеса  $5 \cdot 10^7$  Н/м<sup>2</sup>) за сутки аккумулируется одним модулем энергия  $W_L = 30$  Дж, заряд  $Q = 15,6$  Кл, мощностью  $P = 7,5$  кВт.

Перспективным направлением развития пьезогенераторов в космической отрасли является

создание типоряда пьезогенераторов на многослойных пьезоактюаторах, преобразующих энергию механических вибрационных колебаний космических аппаратов в электрическую энергию, и аккумуляцию ее в источники питания. Так, механические виброколебания космических аппаратов до 2 г и более позволяют за один цикл получить электроэнергию до 2 мкВт и более. Мощность, вырабатываемая в течение 1 мин полета, составляет до 100 мкВт, а за 1 день — до 80 Вт.

За рубежом приведены результаты исследований по возможности создания пьезоэлектрических генераторов на основе многослойных пьезоэлектрических актюаторов осевого типа (рис. 7).

Компания Cedrat Technologies [5] разработала на базе многослойных пьезоактюаторов осевого типа АРА 60SM пьезогенератор, который преобразует механические ударные нагрузки в электроэнергию в количестве, достаточном для питания радиолокационного передатчика для его работы в радиусе до 10 м.

В сообщении [19] приведены результаты предварительных исследований макетного образца пьезогенератора (размеры  $4'' \times 0,5'' \times 0,1''$ ), преобразующего вибрацию вертолета Bell модель М412 в электрическую энергию (при изменении вибрации в диапазоне 200...420 Гц на частоте 5 Гц была получена электрическая мощность в диапазоне 230...400 мкВт).

Системы активной виброзащиты и снижения уровня шума на основе многослойных пьезоактюаторов в отличие от традиционных электромеханических вибропреобразователей позволяют:

- уменьшить массогабаритные показатели в 10 и более раз;
- снизить энергопотребление более чем в 5 раз;
- обеспечить работу в частотном диапазоне от единиц герц до килогерц.

Проведенные институтом машиноведения РАН имени академика А. А. Благонравова (НИИ МАШ)

Таблица 4

Результаты исследований прочности генератора

Параметры	Значения	
	Расчет	Эксперимент
При приложении давления		
Напряжение, В	88	75
Заряд, Кл	$3,52 \cdot 10^{-3}$	$3,0 \cdot 10^{-3}$
Энергия, Дж	$70 \cdot 10^{-3}$	$60 \cdot 10^{-3}$
При снятии давления $60 \cdot 10^{-3}$		
Напряжение, В	88	66
Заряд, Кл	$3,52 \cdot 10^{-3}$	$2,64 \cdot 10^{-3}$
Энергия, Дж	$70 \cdot 10^{-3}$	$52,8 \cdot 10^{-3}$
<p><b>Примечание:</b> повторяемость наблюдалась в более чем 20 циклах и в таблице приведены средние значения (с точностью <math>\pm 5\%</math>).</p>		

совместно с АО "НИИ "Элпа" предварительные исследования многослойных пьезоактюаторов в системах активного гашения вибрации подтвердили перспективность применения многослойных пьезоактюаторов в этой области техники. Созданные на их основе виброгасители будут обладать совокупностью важных свойств.

Значительная эффективность пьезоэлектрических систем, позволяющая генерировать управляемые колебания, необходимые для работы активной системы виброгашения (АСВ) дает возможность создавать эффективные кинематические конструкции. Кинематические и силовые воздействия при относительно малых (для аналогов электромеханических преобразований) амплитудных управляющих напряжениях (до 100...200 В) обладают следующими преимуществами:

- высокой широполосностью и равномерностью электромеханического преобразования, позволяющими осуществлять гашение вибрации в диапазоне частот до нескольких декад;
- незначительной зависимостью эффективности и линейности преобразования от изменений квазистатической нагрузки, обусловленных линейными и угловыми ускорениями изделий;
- большей несущей способностью, позволяющей устанавливать многослойные пьезоактюаторы последовательно с опорными виброизоляторами;
- предварительные исследования, проведенные Институтом машиноведения имени А. А. Благонравова РАН и СКБ Морские технологии, показали, что активная система гашения вибрации гидроакустического шума в циркуляционных трактах охлаждения подводных лодок на основе применения многослойных пьезоэлектрических преобразователей уменьшает значение шума на 10...12 дБ;
- за рубежом интенсивно ведутся исследования снижения вибрации и шума корпуса и двигателя самолета и вертолета в 1,5—2 раза;
- экспериментально подтверждается возможность подавления изгибно-крутящего флаттера крыла до 70 %.

Созданы активные системы виброгашения вибрации корпуса самолета в целях снижения уровня шума в салоне самолета до 10 дБ и более.

Канадская авиастроительная компания Bombardier выпускает гражданские самолеты с уровнем шума в салоне ниже обычного в 4 раза, где реализована активная система гашения вибрации корпуса на основе применения многослойных пьезоэлементов. Активная система виброгашения размещена на фюзеляже самолета, а управление осуществляется звуковыми датчиками, находящимися в салоне, с последующей выдачей управляющего сигнала на наружные системы виброгашения.

Фирма Cedrat Technologies [5] для итальянской авиастроительной и космической корпорации

ALENIA в рамках европейских НИОКР проект MESEMA для уменьшения шума в салоне самолета разработала специальные многослойные пьезоактюаторы типа АРА-900М.

Созданные специальные многослойные пьезоактюаторы для гашения вибрации с учетом конструктивных доработок могут использоваться для гашения вибраций корпусов космических объектов в целях увеличения работоспособности.

АО "НИИ "Элпа" по государственному контракту с Министерством промышленности и торговли Российской Федерации и под контролем представителя заказчика разработаны и освоены специальные многослойные пьезоактюаторы АПМ-1 [24].

Технические параметры разработанных и освоенных в производстве в АО "НИИ "Элпа" многослойных пьезоактюаторов для пьезоэлектрических платформ нанопозиционирования и их зарубежных аналогов приведены в табл. 5.

По своим техническим характеристикам пьезоактюаторы АПМ-1 соответствуют лучшим зарубежным аналогам, по эксплуатационным параметрам — надежность, радиационная стойкость превосходят лучшие зарубежные аналоги.

Перспективные области применения:

- для замены и ремонта, модернизации пьезоизделий в системах высокоточного позиционирования (включая и зарубежные образцы);
- система контроля и управления высокоточным оружием;
- оптико-электронные системы, разведение системы, обнаружение и распознавание цели на дальность до 100 км и более, разрешением до 10 см;
- разрабатываемые квантовые спутниковые системы связи.

В рамках данного договора на базе созданных специальных многослойных пьезоактюаторов разработаны и освоены в производстве пьезоплатформы линейного перемещения нанометрической точности ППЛП-100 [22].

Учитывая основные требования к пьезоплатформам в обеспечении максимального перемещения и их способности к сверхточному позиционированию при минимизации массогабаритных параметров, значение развиваемого усилия не является приоритетным параметром.

Пьезоактюаторы имеют относительно низкое значение перемещения  $\Delta L/L$  при оптимизации конструктивно-технологических решений, оптимизации электрофизических параметров пьезокерамического материала, и оптимальном значении напряженности электрического поля  $E = 2$  кВ/мм значение  $\Delta L/L$  составляет 0,1...0,15 %. Поэтому в целях увеличения перемещения в пьезоплатформе реализовано преобразование механической энергии, запасенной в пьезоактюаторе, в увеличение перемещения за счет его размещения в эллипти-

ческую конструкцию, при этом развиваемое усилие системы уменьшается.

На основании приведенных расчетов и исследований выбраны оптимальные конструкции пьезоэлектрических платформ линейных перемещений с нанометрической точностью ППЛП-100 (рис. 8) на основе применения многослойных пьезоактюаторов АПМ-1.

В ходе выполнения работ по договору с АО "НИИ "Элпа" фирма NT-MDT Co разработала уникальный стенд измерения основных параметров пьезоизделий с нанометрической точностью.

С использованием интерференциально-оптических методов на базе измерительного сканирующего зондового микроскопа измерительный стенд (аттестованный и сертифицированный) позволяет измерять:

- перемещение по осям от 1 до 300 мкм с абсолютной погрешностью измерений не более 0,01 мкм;
- на линейном участке характеристики от 0,2 до 20 % с абсолютной погрешностью не более  $\pm 0,1$  %;
- тангенс угла наклона от 0 до 100 мкрад с точностью  $\pm 2$  мкрад;
- рысканье от 0 до 100 мкрад с точностью  $\pm 2$  мкрад.

Стенд аттестован ВНИИ МС (г. Москва).



Рис. 8. Платформа линейного типа

В табл. 6 приведены основные параметры пьезоэлектрических платформ перемещений и их зарубежных аналогов [23–25].

По своему техническому уровню разработанная пьезоплатформа ППЛП-100 соответствует лучшим зарубежным аналогам. Однако по механико-климатическим параметрам и радиационной стойкости существенно превосходит аналоги и может быть использована в специальных изделиях военного и космического назначения.

В рамках программы импортозамещения в АО "НИИ "Элпа" разработано и организовано производство типоряда угловых пьезоплатформ ПНП на основе дифференциально-управляющих пьезоактюаторов, прототипом которых является типоряд наклонных пьезоплатформ S 330 фирмы Physik In-

Таблица 5

Основные параметры многослойных пьезоэлектрических актюаторов для систем нанопозиционирования

Тип наименования актюатора	Размер пьезоблока, мм × мм	Максимальное перемещение, мкм	Развиваемое максимальное усилие, Н $\pm 10$ %	Статическая емкость, мкФ $\pm 20$ %	Резонансная частота, кГц $\pm 20$ %
Physik Instrument (Германия)					
P 885.11	5 × 5 × 9	6,8 ± 20 %	800	0,6	135
P 885.31	5 × 5 × 13,5	13 ± 20 %	870	1,1	90
P 885.51	5 × 5 × 18	18 ± 10 %	900	1,5	70
P 885.91	5 × 5 × 36	3,8 ± 10 %	950	3,1	40
Piezosystem Jena (Германия)					
P 201-40	5 × 5 × 9	9 ± 20 %	850	0,8	130
P 202-40	5 × 5 × 20	20 ± 10 %	850	1,8	70
P 203-40	5 × 5 × 30	30 ± 10 %	850	2,4	50
P 205-40	5 × 5 × 41	40 ± 10 %	850	3,6	40
NEC Tokin (Япония)					
AEO 505008	5 × 5 × 10	11 ± 20 %	850	0,75	135
AEO 505016	5 × 5 × 20	28 ± 20 %	850	1,4	70
AEO 5050044	5 × 5 × 40	40 ± 10 %	850	3,4	35
Cedrat Technologies (Франция)					
V-MLA 2510	2,5 × 5 × 10	10 ± 20 %	240	0,22	130
V-MLA 5510	5 × 5 × 10	10 ± 20 %	1000	0,55	130
V-MLA 5520	5 × 5 × 20	20 ± 20 %	1000	1,2	60
АО "НИИ "Элпа" (Россия)					
АПМ-1-3	5 × 5 × 9	8 ± 15 %	1000	1,0	130
АПМ-1-7	5 × 5 × 18	20 ± 15 %	1000	1,6	70
АПМ-1-12	5 × 5 × 37	38 ± 15 %	1000	3,6	40
АПМ-1-3М	5 × 5 × 9	11 ± 15 %	1100	1,6	130
АПМ-1-7М	5 × 5 × 518	26 ± 15 %	1100	3,6	70
АПМ-1-12М	5 × 5 × 37	50 ± 15 %	1100	7,5	40

strumente. Основные параметры пьезоэлектрической пьезоплатформы ПНП и зарубежных аналогов приведены в табл. 7.

Пьезоэлектрические наклонные платформы типа ПНП сконструированы на основе параллельной кинематики: с компланарными осями пьезоактюаторов, воздействующих на одну ось подвижной платформы. Две пары дифференциально управляемых пьезоактюаторов обеспечивают угловую ста-

бильность и линейность. Каждая пара работает в режиме "тяги-толкай".

Пьезоэлектрическая наклонная платформа ПНП-10 (рис. 9) применяется взамен S330 в оптико-локационных станциях МИГ 29К/КУБ СУ 35 и вертолетах КА 52, разработана в АО НПК СПП г. Москва.

В статье "The Kussian Air Force Was Aleways Behind the West in one Key Arca" (Unil Now) 11.05.2016

Таблица 6

Основные параметры пьезоэлектрических платформ перемещений ППЛП-100 и их зарубежных аналогов

Основные параметры	Ед. изм.	Значение параметров				
		ППЛП-100 (АО "НИИ "Элпа")	P612 (Physik Instr) Германия	NPXY100SG (New Port) CIF	SXY-120 (Piezosystem Jena) Германия	XY200M (Cedrat Technologies) Франция
Перемещение по осям	—	X, Y	X, Y	X, Y	X, Y	X, Y
Тип датчика положения	—	Тензорезистивные				
Амплитуда перемещения по X и Y при максимальном напряжении без ОС, не менее	мкм	130	130	100	120	200
Разрешение по осям XY (без ОС), не более. Электронный шум источника питания не более $5 \cdot 10^{-4}$ В	нм	1,0	1,0	0,8	1,0	1,0
Нелинейность, по осям X и Y (без ОС), не более	%	0,4	0,4	2,0	0,4	1,0
Угловое отклонение по оси Z (тангаж) (с ОС)	мкрад	+10	±10	—	±10	±10
Угловое отклонение по от X и Y (рысканье) (с ОС)	мкрад	+10	±10/±50	—	±10/±50	—
Диапазон напряжений	В	-20...+120	-20...+120	-20...+130	-20...+130	-20...+150
Габаритные размеры	мм × мм	55 × 55 × 27	60 × 60 × 18	100 × 100 × 22	60 × 60 × 20	100 × 100 × 22
Вес	г	190	195	190	250	180
Тип сервоконтроллера для осуществления обратной связи	—	СК-1	E503	NPC3	NV4013	LA75A2

Таблица 7

Основные параметры пьезоэлектрических наклонных платформ ПНП и их зарубежных аналогов S330

Основные параметры	Ед. изм.	Значение параметров					
		АО "НИИ "Элпа"			Physik Instrument		
		ПНП-2	ПНП-5	ПНП-10	S330-2	S330-4	S330-8
Допустимые направления перемещения	—	$Q_x, Q_y$	$Q_x, Q_y$	$Q_x, Q_y$	$Q_x, Q_y$	$Q_x, Q_y$	$Q_x, Q_y$
Тип встроенных датчиков перемещения	—	тензорезистивные					
Смещение (ZX, ZY), при максимальном значении управляющих направлений, не менее	мкм	15	30	45	—	—	—
Диапазон угла поворота по осям X, Y при подаче управляющих напряжений	Угл. мин.	5	10	20	5	10	20
Разрешение, не более	мкрад	0,5	1,0	1,0	0,5	0,5	1,0
Диапазон управляющих напряжений	В	-60...+60	-50...+50	-50...+50	-50...+50	-50...+50	-50...+50
Электрическая емкость по осям X, Y, +20 %	мкФ	3,5	7	10	3,0	6,0	12,5
Сопротивление изоляции, не менее	МОм	20	30	50	—	—	—
Диапазон управляющих напряжений пьезоактюатора	В	-20...+120	-20...+120	20...+120	-20...+120	20...+120	-20...+120
Габаритные размеры ±0,5 мм	мм	∅28 × 37	∅28 × 55	∅28 × 91	∅28 × 37	∅28 × 55	∅28 × 91
Масса, не более	г	200	380	700	200	380	700
Изменение сопротивления моста тензорезистора в диапазоне изменения управляющих напряжений	Ом	0,08	0,08	0,08	—	—	—
Диапазон рабочих температур	°С	-40...+85	-40...+85	-40...+85	-20...+80	-20...+80	-20...+80



Рис. 9. Платформа ППП-10

года автор Dave Majumdar (редактор National Interest) отмечает, что впервые в России на базе многослойных пьезоактюаторов АО "НИИ "Элпа" созданы образцы авиационной системы целеуказания для ВВС — аналога четвертого поколения приемников, установленных на самолетах F-15, F-16, FIA-18.

Фирма Cedrat Technologies разработала на базе многослойных пьезоактюаторов XY25 сканер для высокоскоростного микросканирования, обеспечивающего повышенное разрешение инфракрасных камер. Короткое время отклика пьезоактюатора используют для формирования комбинированного изображения из нескольких снимков с частотой 100 Гц и более. Эти камеры установлены на военно-транспортных средствах.

Применение пьезоизделий в системах автофокусировки видеокамер и их аналогов обеспечивает автоматическое наведение резкости оптических систем и повышенные разрешения более чем в 2 раза.

В АО "НИИ "Элпа" разработан дополнительный механизм для двухкоординатного или наклонного смещения оптики на базе конструкций пьезоэлектрических платформ. Этот исполнительный механизм применяется для активной стабилизации изображения и особенно эффективен при движениях камер или систем наблюдения космического базирования.

В системах оптического микросканирования применение пьезоэлектрических платформ позволяет увеличить разрешение изображения и другие параметры за счет периодического линейного наносмещения оптики или непосредственно датчика изображения по двум координатам. Основное преимущество микросканирования — более высокое разрешение при уменьшении массогабаритных параметров.

Высокая точность позиционирования востребована в таких изделиях, как космические интерферометры, лазеры, телескопы и антенны.

## Заключение

В настоящее время АО "НИИ "Элпа" имеет научно-технический задел, необходимый для разработки пьезоактюаторов и изделий на их основе.

Основные области применения пьезоактюаторов и пьезоплатформ с нанопозиционированием:

- в квантово-оптических и оптико-электронных системах воздушного, морского и космического базирования:
    - позиционирование, юстировка положения зеркал, призм, линз в интерферометрических модулях с точностью до нанометров;
    - управление лазерным лучом в пространстве, изменение конфигурации оптической системы в условиях вибрации и турбулентности с нанометрической точностью и быстродействием 1...10 мс;
    - контроль и подстройка линий оптико-волоконной связи;
    - управление адаптивными зеркалами в системах передачи в лазерных радиолокационных системах и направленной энергии с повышением быстродействия и точности в 3—5 раз, с перемещением 100 мкм с точностью до 0,01 мм;
    - стабилизация изображения;
    - автоматическая фокусировка и мультипликация элементов изображения;
    - измерение параметров движения и траектории полетов;
    - фотометрическая регистрация и получение изображения военно-космической техники при полигонных испытаниях;
    - передача информации об обнаружении, засечка излучения при военно-космическом мониторинге;
  - в системах и комплексах космического приборостроения:
    - комплексы оптико-электронной аппаратуры для космического аппарата зондирования поверхности;
    - космическая аппаратура научного назначения для исследований дальнего космоса;
    - космические системы для дистанционного исследования природных ресурсов Земли.
- Деформационно-измерительные и управляющие системы в ракетно-космической отрасли на основе многослойных пьезокерамических структур, отличающиеся высокой надежностью, малыми массой и размерами, с низким энергопотреблением и высоким быстродействием, что позволяет решать задачи, с одной стороны, работы при низких температурах, с другой стороны, получения достоверных данных высокоточных измерений.
- Использование отечественной технологии изготовления многослойных структур, разработан-

ной в АО "НИИ "Элпа", позволяет изготавливать широкий спектр пьезоэлементов и использовать их в ракетно-космической технике, а также в рамках импортозамещения элементов и высокоточных приводов в критических узлах аппаратуры других отраслей техники. Изготавливаемые пьезоизделия АО "НИИ "Элпа" практически не уступают по параметрам зарубежным аналогам, а разработанные технические решения превосходят по надежности и механической стойкости зарубежные аналоги.

### Список литературы

1. Web site of Physik Instrumente: <https://www.physikinstrumente.com>
2. Web site of ThorLabs: <https://www.thorlabs.com>
3. Web site of Ceram Tech: <https://www.ceramtechgroup.com>
4. Web site of Newport: <https://www.newport.com>
5. Web site of Cedrat Technologies: <https://www.cedrat-technologies.com>
6. Web site of Morgan Electroceramics: <https://www.morganelectroceramics.com>
7. Web site of Nec-Tokin: <https://www.tokin.com>
8. Сайт АО "НИИ "Элпа": <https://www.elpapiezo.ru>
9. **Брушкин Л. Р.** Функциональная электроника на основе пьезоэффекта. М.: Техносфера, 2014, 110 с.
10. Сайт АО "Концерн "Океанприбор": <https://oceanpribor.ru>
11. Сайт АО НИИФИ: <https://www.nifi.ru>
12. Сайт НКТБ "Пьезоприбор": <http://piezopribor.com>
13. **Панич А. Е., Жуков С. Н.** Пьезокерамические актюаторы. Пьезоэлектрическое приборостроение // Ростов-н-Д.: ЦВ ВР, 2008. 159 с.
14. **Торгашин С. И., Чебурахин И. Н., Андреев В. Г. и др.** Перспективы создания пьезоактюаторов для систем измерения, контроля и управления объектов ракетно-космической техники и наземной космической инфраструктуры // Ракетно-космическое приборостроение и информационные системы. 2019. Том 6. № 3. С. 93–100.
15. **Chang Z., Sherrit S., Bao X., Bar-Cohen Y.** Design and analysis of ULTRASONIC horn for USDC (ULTRASONIC/Sonic driller/Corer), NASA/JPC, 2003.

16. **Werevs M., Lafant J.** Ultrasound underwater transducer for extracorporeal shock wave lithotripsy // Bucharest, Romania: Romanian Reports in Physics, 2005.

17. **Шанин О. И.** Адаптивные оптические системы в импульсных мощных лазерных установках. М.: Техносфера, 2012.

18. **Wang K., Calux D. A., Muktant B., Premont A.** Damping Augmentation of large Deformable mirror for adaptive optics // Actuator 18—16<sup>th</sup> International Conference of New Actuators, Bremen Germany 25—27 June 2018 Conference Proceeding, pp. 134—137.

19. **Pertsh P.** Piezoelectric Actuator Applications. (Review) // Actuator 18—16<sup>th</sup> International Conference of New Actuators, Bremen Germany 25—27 June 2018, Conference Proceeding, pp. 87—93.

20. **Гриценко А. Л., Никифоров В. Г., Щеголева Т. В.** Состояние и перспективы развития пьезоэлектрических генераторов // Компоненты и технологии. 2012. № 9. С. 63—68.

21. **Никифоров В. Г., Чернов В. А.** Предельные параметры твердотельных многослойных пьезоэлектрических батарей // Инновационные процессы пьезоэлектрического приборостроения и нанотехнологии/ сборник трудов VII Международной научно-технической конференции. Анапа. 22—26 сентября 2008 г. С. 13—14.

22. **Гриценко А. Л., Дайнеко А. В., Нерсесов С. С. и др.** Автономный пьезоэлектрический генератор, // Актуальные проблемы пьезоэлектрического приборостроения: сборник трудов Международной молодежной научной конференции, Анапа, 23—27 сентября 2013 г. С. 107—111.

23. **Arms S. W., Townsend C. P., Churchill D. L., Augustin M., Yeary D., Darden P.** Nam Phan Tracking Pitch Link Dynamic Loads with Energy Harvesting Wireless Sensors // Presented at the American Helicopter Society 63<sup>rd</sup> Annual Forum (May 1—3, 2007) — Virginia Beach, VA, 2007.

24. **Дайнеко А. В., Никифоров В. Г., Храмов А. М. и др.** Актюаторы пьезоэлектрические многослойные для систем нанопозиционирования // Нано- и микросистемная техника. 2020. Т. 22, № 5. С. 283—292.

25. **Брушкин Л. Р., Дайнеко А. В., Каширин Н. А., Никифоров В. Г. и др.** Состояние и перспективы развития отечественных пьезоэлектрических платформ нанопозиционирования // Компоненты и технологии. 2020. № 5. С. 17—21.

26. **Брушкин Л. Р., Дайнеко А. В., Каширин Н. А., Никифоров В. Г. и др.** Состояние и перспективы развития отечественных пьезоэлектрических платформ нанопозиционирования // Компоненты и технологии. 2020. № 6. С. 54—59.

**Dayneko A. Y., Ph. D.,** Deputy CEO of Science and Innovation, [ddd@elpapiezo.ru](mailto:ddd@elpapiezo.ru),

**Nikiphorov V. G., Ph. D.,** Leading Researcher,

Elpa Research Institute and Pilot Line, JSC, Moscow, Zelenograd, 124460, Russian Federation

*Corresponding author:*

**Andrey V. Dayneko,** Deputy CEO of Science and Innovation, [ddd@elpapiezo.ru](mailto:ddd@elpapiezo.ru), Elpa Research Institute and Pilot Line, JSC, Moscow, Zelenograd, 124460, Russian Federation

## Review of the State and Prospects of Development and Application of Domestic Multilayer Piezoactuator for Rocket and Space Technology and Ground space Infrastructure

*Received on June 30, 2022*

*Accepted on August 05, 2022*

*The article gives an overview of the state of development and applications of actuators in the world. A method and technology for manufacturing domestic multilayer piezoelectric elements by the method of slip casting from the piezomaterial of the PZT system and multilayer piezoelectric actuators based on them is described. It is noted that in terms of their technical level, multilayer domestic piezo products correspond to the best foreign samples.*

Preliminary studies of multilayer piezoelectric products in Russia and abroad have confirmed their unique capabilities when they work in space instrumentation and ground structures for monitoring and controlling space objects.

The results of studies on the use of multilayer piezo products of JSC "NII "Elpa" and their foreign analogues in systems are given:

The results of the study of various design options for piezoelectric platforms of angular and linear displacements with nanometric accuracy are presented. The optimal design options are selected based on the use of special multilayer piezoactuator APM-1 and APM-2 for their use in rocket and space technology instruments and ground-based space infrastructure.

The technology developed at JSC Research Institute Elpa makes it possible to create promising multilayer piezo products of various classes and purposes for rocket and space equipment and ground-based space infrastructure.

**Keywords:** slurry, multilayer piezoelectric element, actuator, multilayer design for rocket and space instrumentation, adaptive optics, astronomical and space antennas, optoelectronic systems, piezoelectric generators, active vibration damping, spacecraft piezodrives, nanopositioning, piezoplatforms

For citation:

**Dayneko A. V., Nikiforov V. G.** Review of the State and Prospects of Development and Application of Domestic Multilayer Piezoactuator for Rocket and Space Technology and Ground space Infrastructure, *Nano- i Mikrosistemnaya Tekhnika*, 2022, vol. 24, no. 6, pp. 307–322.

DOI: 10.17587/nmst.24.307-322

## References

1. Web site of Physik Instrumente: <https://www.physikinstrumente.com>
2. Web site of ThorLabs: <https://www.thorlabs.com>
3. Web site of Ceram Tech: <https://www.ceramtecgroup.com>
4. Web site of Newport: <https://www.newport.com>
5. Web site of Cedrat Technologies: <https://www.cedrat-technologies.com>
6. Web site of Morgan Electroceramics: <https://www.morganelectroceramics.com>
7. Web site of Nec-Tokin: <https://www.tokin.com>
8. Web site of Akcionerное obshchestvo "Nauchno-issledovatel'skij institut "Elpa" <https://www.elpapiezo.ru> (in Russian).
9. **Brushkin L. R.** Funkcional'naya elektronika na osnove p'ezoeffekta / Nersesov S. S. (Ed.); AO "NII "Elpa". Moscow, Tekhnosfera, 2014. 110 p. (in Russian).
10. Web site of AO "Koncern "Okeanpribor": <https://oceanpribor.ru> (in Russian)
11. Web site of Akcionerное obshchestvo "Nauchno-issledovatel'skij institut fizicheskikh izmerenij (NIIFI): <https://www.nifi.ru> (in Russian).
12. Web site of Nauchnoe konstruktorsko-tehnologicheskoe byuro NKTB "P'ezopribor": <http://piezopribor.com> (in Russian).
13. **Panich A. E.** P'ezokeramicheskie aktyuatory. *P'ezoelektricheskoe priborostroenie. Rostov-n-D., CV VR*, 2008. 159 p. (in Russian).
14. **Torgashin S. I., Cheburakin I. N., Andreev V. G.** et al. Perspektivy sozdaniya p'ezoaktyuatorov dlya sistem izmereniya, kontrolya i upravleniya ob'ektov raketno-kosmicheskoy tekhniki i nazemnoj kosmicheskoy infrastruktury. *Raketno-kosmicheskoe priborostroenie i informacionnye sistemy*, 2019, vol 6, no 3, pp. 93–100. (in Russian).
15. **Chang Z., Sherrit S., Bao X., Bar-Cohen Y.** Design and analysis of ULTRASONIC horn for USDC, *ULTRASONIC/Sonic driller/Corer, NASA/JPC* 2003.
16. **Werevs M., Lafant J.** Ultrasound underwater transducer for extracorporeal shock wave lithotripsy, Bucharest, Romania, Romanian Reports in Physics, 2005.
17. **Shanin O. I.** Adaptivnye opticheskie sistemy v impul'snyh moshchnyh lazernyh ustanovkah. Moscow, Tekhnosfera, 2012 (in Russian)
18. **Wang K., Calux D. A., Maktant B., Premont A.** Damping Augmentation of large Deformable mirror for adaptive optics, *Actuator 18–16<sup>th</sup> International Conference of New Actuators, Bremen, Germany, 25–27 June 2018, Conference Proceeding*, pp. 134–137.
19. **Pertsh P.** Piezoelectric Actuator Applications — status 2018 (Review), *Actuator 18–16<sup>th</sup> International Conference of New Actuators, Bremen, Germany, 25–27 June 2018, Conference Proceeding*, pp. 87–93.
20. **Gricenko A., Nikiforov V., Shchyogoleva T.** Sostoyanie i perspektivy razvitiya p'ezoelektricheskikh generatorov, *Komponenty i tekhnologii*, 2012, no. 9, pp. 63–68 (in Russian).
21. **Nikiforov V. G., Chernov V. A.** Predel'nye parametry tverdotel'nyh mnogoslujnyh p'ezoelektricheskikh batarej, *Innovacionnye processy p'ezoelektricheskogo priborostroeniya i nanotekhnologii, Sbornik trudov VII Mezhdunarodnoj nauchno-tekhnicheskoy konferencii. Anapa*, 22–26 sentyabrya 2008, pp. 13–14 (in Russian).
22. **Gricenko A. L., Dajneko A. V., Nersesov S. S.** et al. Avtonomnyj p'ezoelektricheskij generator, *Aktual'nye problemy p'ezoelektricheskogo priborostroeniya, sbornik trudov Mezhdunarodnoj molodezhnoj nauchnoj konferencii, Anapa*, 23–27 sentyabrya 2013, pp. 107–111 (in Russian).
23. **Arms S. W., Townsend C. P., Churchill D. L., Augustin M., Yeary D., Darden P.** Nam Phan Tracking Pitch Link Dynamic Loads with Energy Harvesting Wireless Sensors. Presented at the American Helicopter Society 63<sup>rd</sup> Annual Forum, May 1–3, 2007 — Virginia Beach, VA, 2007.
24. **Dajneko A. V., Nikiforov V. G., Khramtsov A. M.** et al. Aktyuatory p'ezoelektricheskikh mnogoslujnyh dlya sistem nanopozicionirovaniya, *Nano- i mikrosistemnaya tekhnika*, 2020, vol. 22, no. 5, pp. 283–292 (in Russian).
25. **Brushkin L. R., Dajneko A. V., Kashirin N. A., Nikiforov V. G.** et al. Sostoyanie i perspektivy razvitiya otechestvennyh p'ezoelektricheskikh platform nanopozicionirovaniya, *Komponenty i tekhnologii*, 2020, no. 5, pp. 17–21 (in Russian).
26. **Brushkin L. R., Dajneko A. V., Kashirin N. A., Nikiforov V. G.** et al. Sostoyanie i perspektivy razvitiya otechestvennyh p'ezoelektricheskikh platform nanopozicionirovaniya, *Komponenty i tekhnologii*, 2020, no. 6, pp. 54–59 (in Russian).

# УКАЗАТЕЛЬ СТАТЕЙ, ОПУБЛИКОВАННЫХ В ЖУРНАЛЕ "НАНО- И МИКРОСИСТЕМНАЯ ТЕХНИКА" В 2022 г.

## НАНОТЕХНОЛОГИИ И ЗОНДОВАЯ МИКРОСКОПИЯ

- Лемешко П. С., Спивак Ю. М., Мошников В. А. Возможности мультифотонной микроскопии в исследованиях полупроводниковых наноматериалов. . . . . № 6
- Мальцев П. П., Ганжа А. А., Павлов В. Ю., Михалев А. О., Козлитин А. И. Формирование полимерных нитей с наноразмерными образованиями из алюминия. . . . . № 5
- Шапошников С. С. Исследование автоэмиссионных свойств многоэмиттерных катодов из углеродных нанотрубок. . . . . № 6

## МОДЕЛИРОВАНИЕ И КОНСТРУИРОВАНИЕ МНСТ

- Горюнов И. В., Иовдальский В. А., Федоров Н. А., Терёшкин Е. В., Медянцева Е. В. Улучшение электрических характеристик ГИС генераторного модуля СВЧ диапазона. . . . . № 5
- Гусева О. С., Козлов Д. В., Корпухин А. С., Смирнов И. П., Андреев П. А. Применение фемтосекундного лазера при изготовлении кварцевых чувствительных элементов МЭМС-акселерометров. . . . . № 1
- Оракова М. М., Мустафаев Г. А., Нагаплежева Р. Р. Исследование влияния чистоты поверхности кремния на ее смачиваемость. . . . . № 1
- Сарапульцев Д. А., Золоторев А. А., Цареградская М. Л. Анализ и макетирование направленного ответвителя СВЧ диапазона частот как SMD-компонента. . . . . № 3
- Шаломанов В. И., Золотарев А. А. Моделирование широкополосного усилителя мощности с низким уровнем шума на элементной базе фаундри РФ. . . № 4

## МАТЕРИАЛОВЕДЧЕСКИЕ И ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ МНСТ

- Беспалов В. А., Гусев Е. Э., Дюжев Н. А., Иванин П. С., Махиборода М. А. Обзор существующих методов микросборки. . . . . № 3
- Беспалов В. А., Гусев Е. Э., Дюжев Н. А., Махиборода М. А., Фомичев М. Ю. Обзор технологии адгезивного бондинга для нано- и микросистемной техники. . . . . № 4
- Бохов О. С., Лучинин В. В., Афанасьев П. В., Старцев В. А., Мандрик И. В. Формирование многослойных гибких коммутационных плат по аддитивной технологии каплеструйной печати. . . № 3

- Галиев Г. Б., Климов Е. А., Пушкарев С. С., Сарайкин В. В., Васильевский И. С., Виниченко А. Н., Грехов М. М., Клочков А. Н. Структурные свойства сверхрешеток {LTG-GaAs/GaAs:Si} на подложках GaAs (100) и (111)A. . . . . № 2
- Галиев Р. Р., Павлов А. Ю., Тарасов Н. С., Томош К. Н. Особенности технологии латерально-связанной брэгговской решетки одночастотных лазерных диодов с распределенной обратной связью. . . . № 2
- Гамкрелидзе С. А., Гнатюк Д. Л., Матвеев О. С., Бугаев С. А., Галиев Р. Р., Зуев А. В., Лаврухин Д. В., Михалев А. О., Павлов А. Ю., Щаврук Н. В., Мальцев П. П. Разработка монолитных интегральных схем на гетероструктурах нитрида галлия. . . . . № 2
- Глинский И. А., Ячменев А. Э., Лаврухин Д. В., Хабидуллин Р. А., Гамкрелидзе С. А., Зайцев К. И., Спектор И. Е., Пономарев Д. С. Плазмонные метаповерхности для управления спектром генерации источников терагерцового излучения. . . . . № 2
- Глухова О. Е., Слепченков М. М., Петрунин А. А. Механические и электронные свойства углеродного композитного 3D-наноматериала с топологией островкового типа. . . . . № 3
- Гусев Е. Э., Вертянов Д. В., Дюжев Н. А., Махиборода М. А., Тимошенков С. П. Технология временного бондинга для интеграции полупроводниковых пластин разного диаметра. . . . . № 5
- Дрозд А. В., Яфясов А. М., Барабан А. П., Никифорова И. О. Технология молекулярного наслаивания при создании микроканальных пластин с высоким аспектным отношением. . . . . № 5
- Климов Е. А., Пушкарев С. С., Клочков А. Н. Влияние встроенного пьезоэлектрического поля на спектры фотолюминесценции упруго напряженных сверхрешеток InGaAs/GaAs на подложках GaAs (110) и (111)A. . . . . № 6
- Кошелева Н. Н. Материал чувствительного элемента на основе диоксида олова для датчика газов. . . . № 5
- Мустафаев М. Г., Мустафаев Г. А., Мустафаева Д. Г. Повышение эффективности микроэлектронной технологии при создании функционально-интегрированных элементов. . . . . № 5
- Наумов А. В., Орехов Д. Л., **Кульчицкий Н. А.** Развитие метода Чохральского для монокристаллического кремния в нано- и микроэлектронике. . . . № 4
- Редькин С. В. Лазерная плазмохимия. . . . . № 2
- Савельев Д. В., Мусатов В. И. Новый тип магнитного материала для создания анизотропного магнитоэлектрического эффекта. . . . . № 4

**Филиппов И. А., Пронин И. А., Китаев А. С.** Влияние температуры спекания порошка оксида цинка на варисторные свойства структур на его основе . . . . . № 6

## ЭЛЕМЕНТЫ НМСТ

**Александров П. А., Фанченко С. С., Ефименко Е. В.** Оценка влияния облучения тяжелыми заряженными частицами на работу МОП-транзистора . . . . . № 1

**Алешин А. Н., Зенченко Н. В., Рубан О. А.** Особенности формирования токопроводящих каналов в мемристорах на основе твердых электролитов . . . . . № 2

**Дайнеко А. В., Никифоров В. Г.** Обзор состояния и перспектив развития и применения отечественных многослойных пьезоактюаторов для ракетно-космической техники и наземной космической инфраструктуры . . . . . № 6

**Зарянкин Н. М., Кочурина Е. С., Виноградов А. И., Боев Л. Р., Анчутин С. А., Тимошенко А. С., Тимошенко С. П.** Разработка и исследование микромеханического датчика вращения . . . . . № 6

**Койгеров А. С.** Достижение критических и предельных параметров в микроприборах на поверхностных акустических волнах . . . . . № 4

**Кулиев М. В.** Влияние состава гетероструктуры на долговременную стабильность СВЧ генератора . . . . . № 1

**Макарова Е. Е., Амеличев В. В., Костюк Д. В., Васильев Д. В., Казаков Ю. В., Орлов Е. П.** Исследование тестовых ячеек энергонезависимой магниторезистивной памяти . . . . . № 3

**Павлов А. Ю., Томош К. Н., Павлов В. Ю., Слаповский Д. Н., Клековкин А. В., Ивченко И. А.** Полевые транзисторы с высокой подвижностью электронов на гетероструктуре AlGaIn/GaN с подзатворным заглублением в барьерный слой . . . № 2

**Рындин Е. А., Маврин И. А., Андреева Н. В., Лучинин В. В.** Нейроморфный электронный модуль,

ориентированный на использование мемристорной ЭКБ, для распознавания изображений. . . . . № 6

**Садков В. Д., Пилькевич А. В.** Малогабаритные поглощающие элементы адаптоаттенуаторов для поверхностного монтажа . . . . . № 3

**Тестов О. А., Гареев К. Г., Лучинин В. В., Комлев А. Е., Тестов Д. О., Тестов И. О., Хмельницкий И. К.** Конформная интегрируемая микро- и нанокомпозиционная пассивная электромагнитная защита объектов биотехносферы . . . . . № 3

**Филиппов И. А., Пронин И. А., Китаев А. С.** Золь-гель синтез полупроводникового порошка оксида цинка для варисторных структур . . . . . № 5

**Хабибуллин Р. А., Пушкарев С. С., Галиев Р. Р., Щаврук Н. В., Дюжиков И. Н., Павловский В. В., Волков О. Ю.** Управление спектральными характеристиками излучения квантово-каскадных лазеров терагерцевого диапазона . . . . . № 2

**Хмельницкий И. К., Лучинин В. В., Горляк А. Н., Айвазян В. М., Алексеев Н. И., Бройко А. П., Орехов Ю. Д., Карелин А. М., Тестов Д. О.** Комплекс миниатюрных бионических робототехнических систем . . . . . № 1

## СИСТЕМЫ В КОРПУСЕ

**Лисицкий А. П., Мальцев П. П., Матвеев О. С., Михалев А. О., Скрынский В. Р.** Методы сборки "система-в-корпусе" в миллиметровом диапазоне длин волн: структуры и материалы. Обзор . . № 1

## БИОЭЛЕКТРОНИКА

**Зимица Т. М., Пудова А. В., Мандрик И. В., Гатауллин А. О.** Биоэлектрические источники энергии на основе цианобактерий . . . . . № 4

## ПРИМЕНЕНИЕ НМСТ

**Спивак Ю. М., Муратова Е. Н., Безверхний В. П., Мошников В. А.** Пористый оксид алюминия для применения в медицине, включая адресную доставку лекарств . . . . . № 5

Рисунки к статье Н. М. Зарянкина, Е. С. Кочуриной, А. И. Виноградова,  
Л. Р. Боева, С. А. Анчутина., А. С. Тимошенко, С. П. Тимошенко  
«РАЗРАБОТКА И ИССЛЕДОВАНИЕ МИКРОМЕХАНИЧЕСКОГО ДАТЧИКА ВРАЩЕНИЯ»

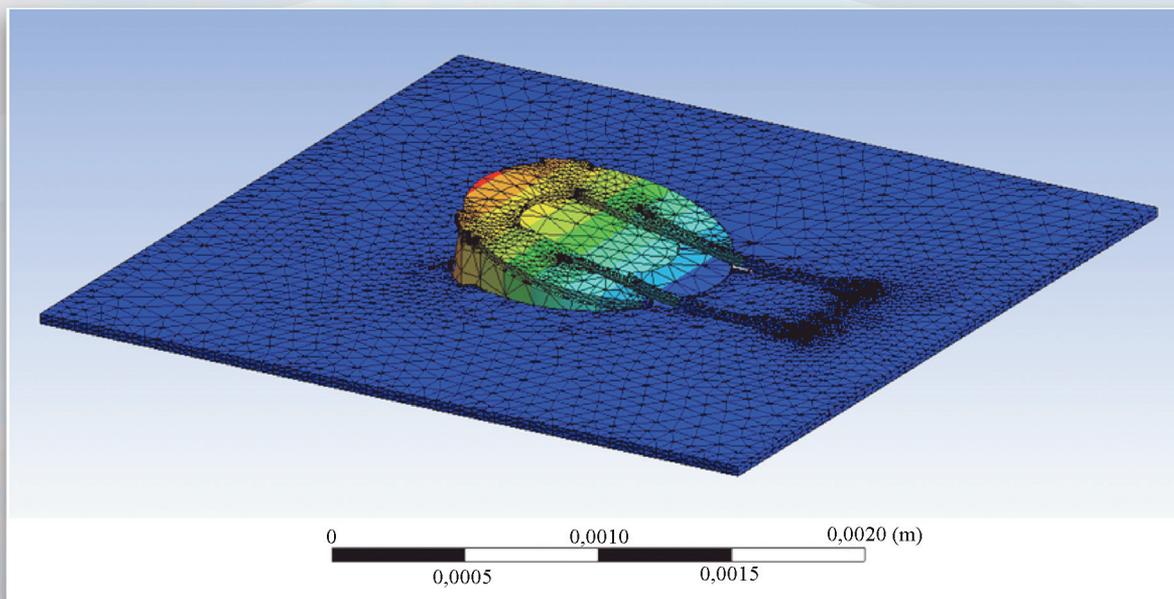


Рис. 2. Результаты моделирования: смещение инерционной массы датчика вращения при воздействии вращения 120 g

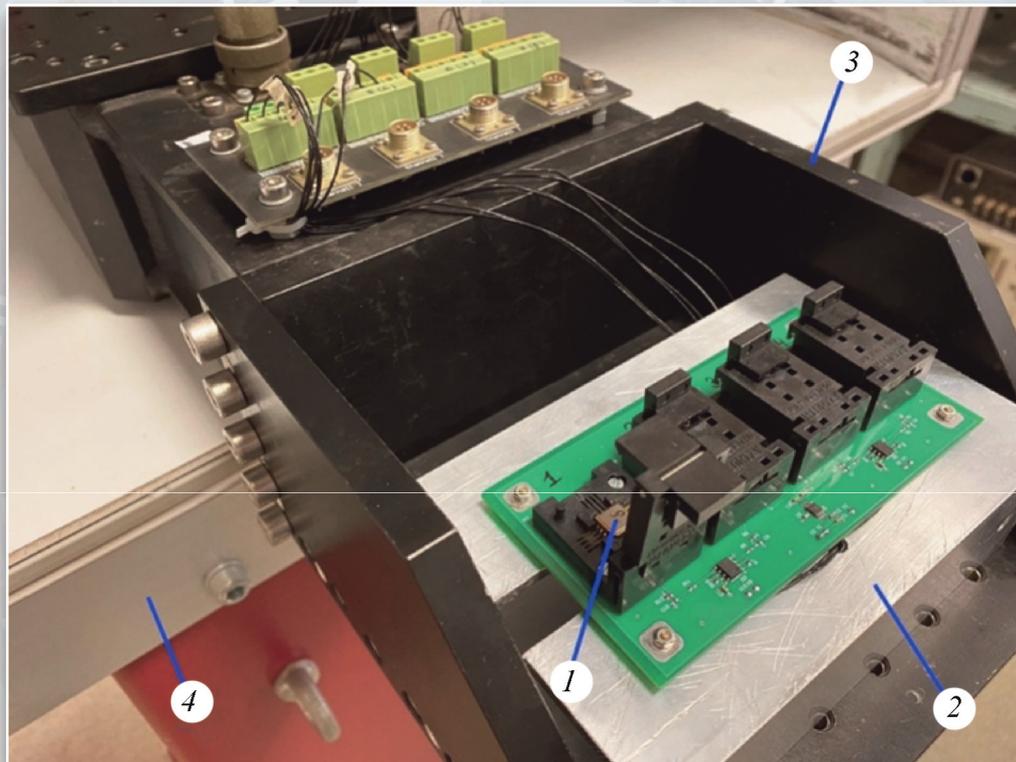


Рис. 4. Стенд для проведения испытаний датчика вращения:  
1 – датчик вращения; 2 – специализированная оснастка; 3 – поворотный стол; 4 – центрифуга

Рисунки к статье А. В. Дайнеко, **В. Г. Никифорова**  
«ОБЗОР СОСТОЯНИЯ И ПЕРСПЕКТИВ РАЗВИТИЯ И ПРИМЕНЕНИЯ  
ОТЕЧЕСТВЕННЫХ МНОГОСЛОЙНЫХ ПЬЕЗОАКТИУАТОРОВ  
ДЛЯ РАКЕТНО-КОСМИЧЕСКОЙ ТЕХНИКИ  
И НАЗЕМНОЙ КОСМИЧЕСКОЙ ИНФРАСТРУКТУРЫ»



Рис. 1. Линия изготовления пьезокерамической пленки

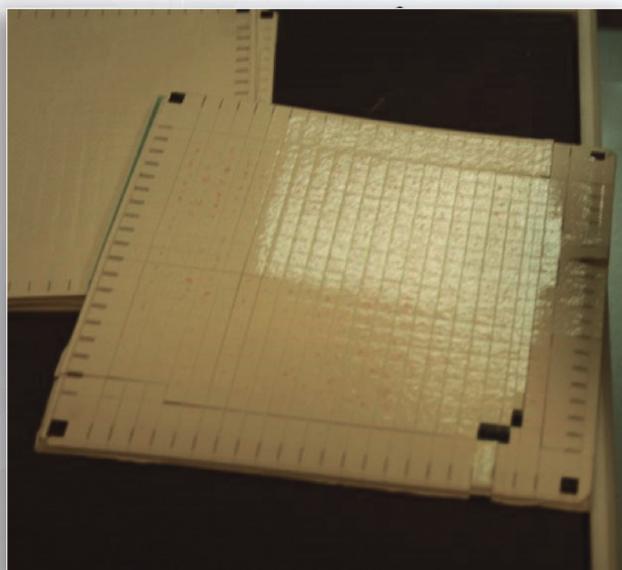


Рис. 2. Пленочная продукция

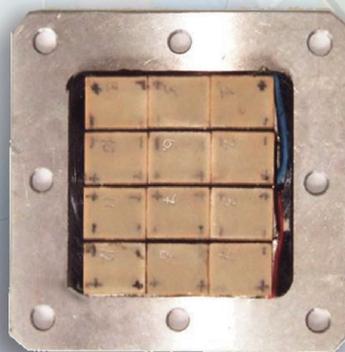


Рис. 6. Конструкция пьезоэлектрического генератора ГН-1 [21]