

Сборник трудов  
XIX Всероссийской конференции  
молодых ученых

Саратов,  
8–9 октября 2024 г.

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки  
Институт радиотехники и электроники им. В. А. Котельникова РАН

Саратовский филиал Федерального государственного бюджетного учреждения  
науки Института радиотехники и электроники  
им. В. А. Котельникова РАН

Саратовский государственный университет им. Н. Г. Чернышевского

# **«НАНОЭЛЕКТРОНИКА, НАНОФОТОНИКА И НЕЛИНЕЙНАЯ ФИЗИКА»**

Доклады XIX Всероссийской конференции молодых ученых

(Саратов, 8 – 9 октября 2024 г.)

Саратов  
Издательство “Техно-Декор”  
2024

УДК 517.9, 531.1  
ББК 22.311я43  
Н25

«Наноэлектроника, нанофотоника и нелинейная физика»: тез. докл.  
XIX Всерос. конф. молодых ученых.  
– Саратов: Изд-во “Техно-Декор”, 2024. – 152 с.: илл.  
ISBN: 978-5-907716-68-1

В сборнике опубликованы материалы XIX Всероссийской конференции молодых ученых «Наноэлектроника, нанофотоника и нелинейная физика». Работы участников связаны с созданием метаматериалов, углеродных наноструктур, нанокompозитных материалов, фононных, магнанных и плазмонных кристаллов и анализа их свойств, исследованием взаимодействия электромагнитных волн с различными средами, изучением сложных, хаотических процессов в динамических системах, применением методов нелинейной динамики в физиологии, медицинской диагностике, информационных системах, радиофизике и электронике.

Для научных работников, преподавателей, аспирантов, студентов, специализирующихся в области радиофизики, электроники, оптики, физики магнитных явлений, акустоэлектроники.

Редакционная коллегия:

кандидат физ.-мат. наук Д. В. Фатеев (отв. редактор)  
кандидат физ.-мат. наук М. Е. Селезнев (отв. секретарь)

Рецензенты:

доктор физ.-мат. наук Б.Д. Зайцев (СФ ИРЭ им. В.А. Котельникова РАН)  
доктор физ.-мат. наук В.И. Пономаренко (СФ ИРЭ им. В.А. Котельникова РАН)  
кандидат физ.-мат. наук Ю.В. Хивинцев (СФ ИРЭ им. В.А. Котельникова РАН)

Конференция организована при финансовой поддержке  
Саратовского филиала Института радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН

УДК 517.9, 531.1  
ББК 22.311я43

ISBN 978-5-907716-68-1

© Саратовский филиал ИРЭ  
им. В. А. Котельникова РАН, 2024

### **Почетный председатель конференции**

Ю. В. Гуляев, акад. РАН, ИРЭ им. В.А.Котельникова РАН,  
Москва, Россия

### **Председатель конференции**

С. А. Никитов, акад. РАН, ИРЭ им. В.А.Котельникова РАН,  
Москва, Россия

### **Зам. председателя конференции**

Ю. А. Филимонов, д-р физ.-мат. наук, Саратовский филиал  
ИРЭ им. В.А.Котельникова РАН, Россия

### **Председатель программного комитета**

С. А. Никитов, акад. РАН, ИРЭ им. В.А.Котельникова РАН,  
Москва, Россия

### **Программный комитет**

Безручко Б.П. – СФИРЭ им. В.А.Котельникова РАН, Саратов, Россия

Вениг С.Б. – СГУ им. Н.Г. Чернышевского, Саратов, Россия

Дмитриев А.С. – ИРЭ им. В.А.Котельникова РАН, Москва, Россия

Зайцев Б.Д. – СФИРЭ им. В.А.Котельникова РАН, Саратов, Россия

Короновский А.А. – СГУ им. Н.Г. Чернышевского, Саратов, Россия

Купцов П.В. – СФИРЭ им. В.А.Котельникова РАН, Саратов, Россия

Мельников Л.А. – СГТУ им. Ю.А. Гагарина, Саратов, Россия

Морозова М.А. – СГУ им. Н.Г. Чернышевского, Саратов, Россия

Попов В.В. – СФИРЭ им. В.А.Котельникова РАН, Саратов, Россия

Прохоров М.Д. – СФИРЭ им. В.А.Котельникова РАН, Саратов, Россия

Роговин В.И. – АО «НПП «Алмаз», Саратов, Россия

Рыскин Н.М. – СФИРЭ им. В.А.Котельникова РАН, Саратов, Россия

Сергеев В.А. – УФИРЭ им. В.А.Котельникова РАН, Ульяновск, Россия

Смирнов В.М. – ФИРЭ им. В.А.Котельникова РАН, Фрязино, Россия

Ушаков Н.М. – СФИРЭ им. В.А.Котельникова РАН, Саратов, Россия

Хивинцев Ю.В. – СФИРЭ им. В.А.Котельникова РАН, Саратов, Россия

Царев В.А. – СГТУ им. Ю.А. Гагарина, Саратов, Россия

Яфаров Р.К. – СФИРЭ им. В.А.Котельникова РАН, Саратов, Россия

**ПЛЕНАРНЫЕ ЛЕКЦИИ**

- Сорокин Борис Павлович (Государственный научный центр РФ "Технологический институт сверхтвёрдых и новых углеродных материалов", Москва, г.о. Троицк, заведующий лабораторией физической акустики акустоэлектронных устройств д.ф.-м.н, профессор) «Исследование плёнок с помощью свч акустических сенсоров на алмазных подложках»
- Купцов Павел Владимирович (СФИРЭ им. В.А. Котельникова РАН, г.н.с., д.ф.-м.н.) «Моделирование нейроморфной динамикой при помощи нейронных сетей»
- Пономаренко Владимир Иванович (СФИРЭ им. В.А. Котельникова РАН, в.н.с., д.ф.-м.н.) "Радиофизическое моделирование автоколебательных систем".
- Фатеев Денис Васильевич (СФИРЭ им. В.А. Котельникова РАН, зам. директора, к.ф.-м.н.) «Поверхностные волны в гидродинамическом графене»

## РАЗРАБОТКА МИНИАТЮРНОЙ ЛБВ W-ДИАПАЗОНА С ЗС ТИПА СДВОЕННАЯ ГРЕБЕНКА И ЛЕНТОЧНЫМ ЭЛЕКТРОННЫМ ПУЧКОМ

О.Р. Абрамов<sup>1</sup>, Р.А. Торгашов<sup>1,2</sup>, В.Н. Титов<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>Саратовский государственный университет им. Н.Г. Чернышевского

<sup>2</sup>Саратовский филиал ИПЭ им. В.А. Котельникова РАН

E-mail: [abramov.ol2003@mail.ru](mailto:abramov.ol2003@mail.ru)

Одним из перспективных приборов для освоения миллиметрового и субмиллиметрового диапазона длин волн является лампа бегущей волны (ЛБВ). Такой усилитель позволяет получить высокие значения как выходной мощности, так и коэффициента усиления в широком диапазоне частот. Ключевым элементом ЛБВ является замедляющая система (ЗС), которая позволяет обеспечить синхронизм с электронным пучком и замедленной электромагнитной волной. Одной из наиболее распространенных конструкций ЗС в миллиметровом и субмиллиметровом диапазоне длин волн является ЗС типа сдвоенная гребенка, в которой возможно взаимодействие с ленточным электронным пучком [1-6]. Схема замедляющей системы типа сдвоенной гребенки представлена на Рис. 1.

В данной работе приведены результаты разработки миниатюрной ЛБВ W-диапазона с ЗС типа сдвоенной гребенки и ленточным электронным пучком. Предварительный проект ЛБВ был представлен в [6]. В данной работе ширина ЗС была уменьшена для достижения синхронизма при напряжении пучка 14.5 кВ в диапазоне частот от 90 до 100 ГГц. Геометрические параметры ЗС представлены в Таблице 1.

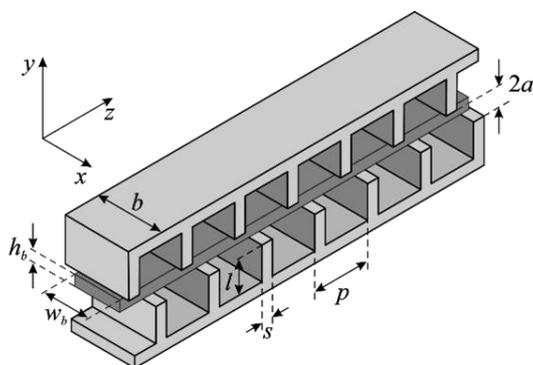


Рис. 1. Схема замедляющей системы типа сдвоенной гребенки.

Параметр	Значение, мм
Период, $p$	0.95
Ширина волновода, $b$	1.85
Ширина ламели, $s$	0.25
Высота ламели, $l$	0.78
Высота пролетного канала, $2a$	0.3
Размеры пучка, $w_b \times h_b$	0.5×0.15

Таблица 1. Параметры замедляющей системы вместе с геометрией пучка

С использованием современных программных пакетов численного моделирования был проведен расчет электродинамических характеристик замедляющей системы. Предложенная конструкция ЗС позволяет достичь широкополосного согласования на +1 прямой пространственной гармонике при напряжениях от 14.5 до 15 кВ. Сопротивление связи рабочей гармоники принимает значение свыше 1 Ом в частотном диапазоне 90-100 ГГц. Также была разработана конструкция система ввода/вывода СВЧ-энергии, которая обеспечивает отражения по уровню менее -20 дБ в рабочем диапазоне частот. При моделировании предполагалось, что ЗС изготовлена из меди с эффективной проводимостью  $\sigma = 2.0 \times 10^7$  См/м. При выбранном значении проводимости омические потери в диапазоне частот 90-100 ГГц составили 0.05-0.06 дБ/период.

Было проведено моделирование электронно-волнового взаимодействия в ЛБВ с ленточным электронным пучком с использованием как классической одномерной модели взаимодействия в ЛБВ, так и с использованием трехмерного РС-метода. В ходе моделирования предполагалось, что ток электронного пучка составляет 100 мА, что соответствует плотности тока  $133 \text{ А/см}^2$ . Длина системы составила 70 периодов. Фокусировка пучка в трехмерных расчетах осуществлялась однородным продольным магнитным полем величиной 0.7 Тл.

Показано, что при напряжении 14.7-14.9 кВ при входной мощности 10 мВт, что соответствует линейному режиму работы усилителя, коэффициент усиления может достигать 28 дБ, а полоса усиления по уровню  $-3 \text{ дБ}$  составляет примерно 10 ГГц. На рис. 2а приведены зависимости коэффициента усиления от частоты при напряжении 14.7 кВ. Также исследованы нелинейные режимы взаимодействия. На рис. 2б приведена зависимость выходной мощности от входной на частоте входного сигнала 90 ГГц при напряжении пучка 14.8 кВ. Мощность в режиме насыщения достигает 65 Вт при входной мощности около 0.3 Вт. В линейном и нелинейном режимах работы наблюдалась полная транспортировка пучка без оседания на поверхность ЗС.

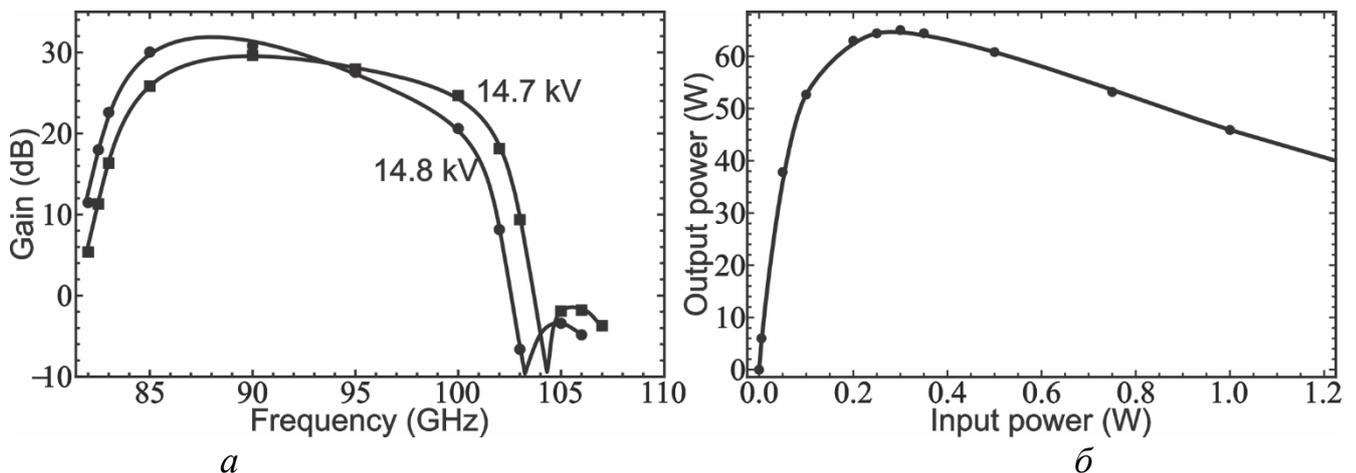


Рис. 2. Результаты моделирования электронно-волнового взаимодействия в ЛБВ: (а) – зависимость коэффициента усиления от частоты при входной мощности 10 мВт и различных значениях напряжения, (б) – зависимость выходной мощности от входной на частоте 90 ГГц при напряжении 14.8 кВ.

*Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда (грант № 22-49-02017).*

#### Библиографический список

1. Shin Y. -M., Baig A., Barnett L. R., et al. // IEEE Trans. Electron Dev. 2011. V. 58, N. 9, P. 3213-3219.
2. Рожнёв А.Г., Рыскин Н.М., Каретникова Т.А. и др. // Изв. вузов. Радиофизика. 2013. Т. 56, № 8-9. С. 601–613.
3. Baig A., Gamzina D., Kimura T., et al. // IEEE Trans. Electron Dev. 2017. V. 64, N. 5, P. 2390-2397.
4. Karetnikova T.A., Rozhnev A.G., Ryskin N.M. et al. // IEEE Trans. Electron Dev. 2018. V. 65, N. 6. P. 2129- 2134.
5. Yang R., Xu J., Yue L. et al. // IEEE Trans. Electron Dev. 2022. V. 69, N. 5. P. 2656-2661.
6. Torgashov R.A., Starodubov A.V., Chistyakov I.A., et al // 2022 IEEE 8th All-Russian Microwave Conference (RMC), Moscow, Russian Federation. 2022. P. 90-93.

## ПРОХОЖДЕНИЕ СПИНОВЫХ ВОЛН В ДВУХСЛОЙНЫХ ВОЛНОВОДАХ С МАГНИТНЫМИ НЕОДНОРОДНОСТЯМИ В РЕЖИМЕ ОДНОНАПРАВЛЕННОГО РАСПРОСТРАНЕНИЯ

Ю.В. Александрова, А.В. Садовников, Е.Н. Бегинин

*Саратовский национальный исследовательский государственный университет*

*им. Н.Г. Чернышевского*

*E-mail: jvaleksandrova@gmail.com*

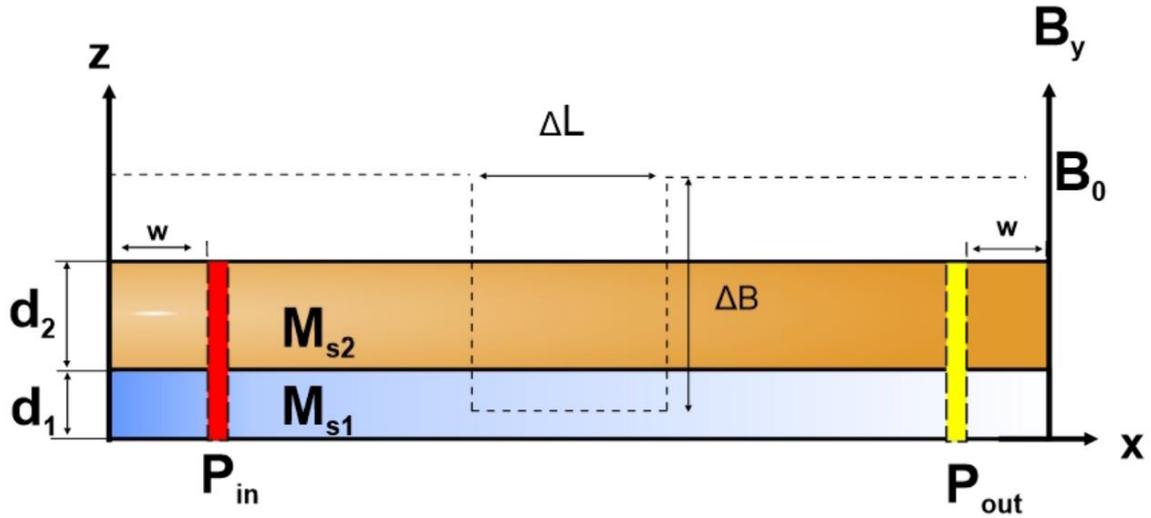
В настоящее время микромагнитное моделирование фактически является стандартным методом изучения свойств магнитных микро- и наносистем, занимая некоторое промежуточное положение между теорией и экспериментом (условно этот метод можно назвать численным экспериментом).

В данной работе методом микромагнитного моделирования спин-волновых возбуждений в магнитных волноведущих структурах, реализованным в свободно распространяемом программном комплексе MuMax3 [1], было проведено решение задачи о рассеянии спиновых волн (СВ) на магнитных неоднородностях формируемых неоднородным внешним магнитным полем. На рис. 1 схематически приведена двухслойная ферромагнитная структура из двух слоев железо-иттриевого граната (ЖИГ) с различными значениями толщин слоев  $d_1=6.9 \mu\text{m}$ ,  $d_2=8.9 \mu\text{m}$  и намагниченностями насыщения  $M_{s1}=72 \text{ kA/m}$  и  $M_{s2}=138 \text{ kA/m}$  каждого слоя, соответственно. Двухслойный микроволновод помещен во внешнее магнитное поле  $B_y=B_0=67 \text{ mT}$  направлено вдоль оси  $y$ , в структуре будет распространяться поверхностная магнитостатическая волна (ПМСВ) [2]. Источник, возбуждения СВ в численном моделировании, расположен на расстоянии  $w$  и по всей толщине структуры, размерами  $10 \mu\text{m} \times L_y \times L_z$ .

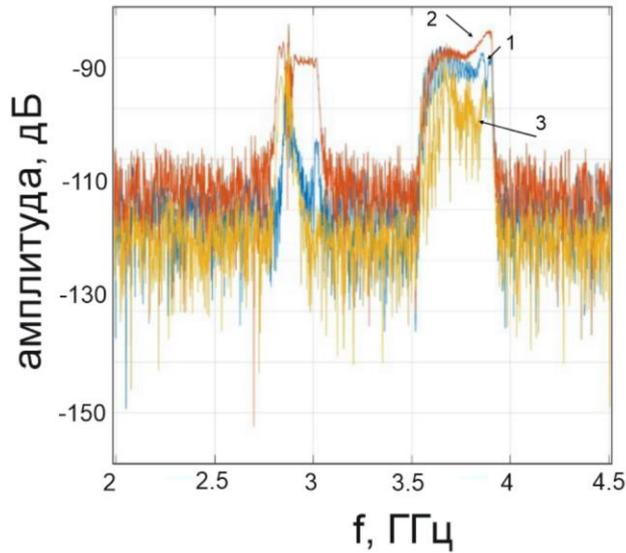
Рассматривается область магнитной неоднородности, которая находится по центру оси  $x$  и характеризуется шириной  $\Delta L$  и глубиной  $\Delta B$ . Неоднородность вида  $B_y=B_0+\Delta B$  – «вал» и  $B_y=B_0-\Delta B$  – «долина». На рис. 1 (б), (в) продемонстрированы амплитудно-частотные характеристики с выходной антенны  $P_{out}$  для двух типов неоднородностей «вал» и «долина». Из них видно, что для неоднородности типа «долина» изменения происходят в низкочастотной области, а для неоднородности типа «вал» изменения происходят в высокочастотной области.

Однонаправленный режим распространения СВ в поперечно ограниченных микроволноводах на основе двухслойных пленок может быть использован для реализации спиновых диодов. Принцип работы, которых основан на невзаимном режиме распространения СВ, при этом в отличие от металлизированных структур, в которых также реализуется невзаимный режим распространения, системы двухслойных микроволноводов обладают более низким уровнем диссипации ввиду отсутствия омических потерь в металле.

(a)



(б)



(в)

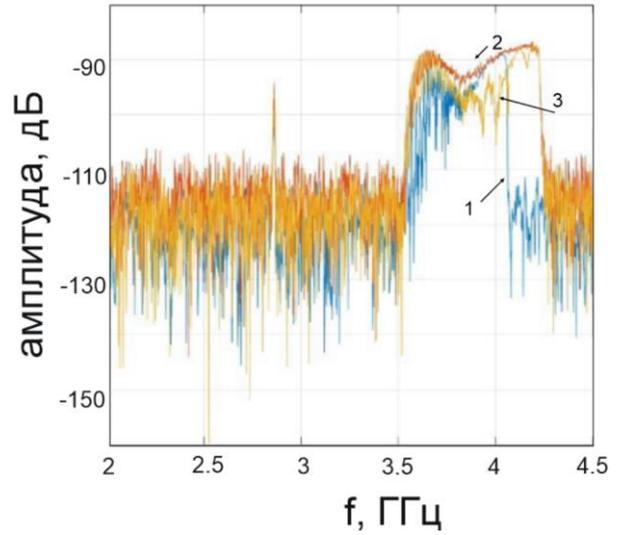


Рис. 1. (а) Схематическое изображение сечения (в плоскости  $(x, z)$ ) волновода, состоящего из двух пленок железо-иттриевого граната с различной намагниченностью.

(б), (в) Амплитудно-частотные характеристики при неоднородности магнитного поля:

1 –  $\Delta B = -8$  мТ поле типа «долина», 2 – однородное поле, 3 –  $\Delta B = 8$  мТ поле типа «вал».

*Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда в рамках выполнения проекта №23-79-30027.*

#### Библиографический список

1. Vansteenkiste A., Leliaert J., Dvornik M., Helsen M., Garcia-Sanchez F., Waeyenberge B.V. // AIP Advances. 2014. V. 4(10), P. 107133.
2. G. Gubbiotti et al. // J. Phys. D: Appl. Phys. 2010. V. 43. P. 264003.

## ИССЛЕДОВАНИЕ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ПРОНИЦАЕМОСТИ ЖИДКИХ ДИЭЛЕКТРИКОВ В X-ДИАПАЗОНЕ ЧАСТОТ

А.А. Андреев, Е.А. Рябов, Б.В. Сергеева, В.Н. Гусятников

Саратовский национальный исследовательский государственный университет  
им. Н.Г. Чернышевского

E-mail: [andreev25304@mail.ru](mailto:andreev25304@mail.ru)

Изучение диэлектрических свойств вещества, т.е. исследование поведения его комплексной диэлектрической проницаемости в зависимости от частоты, температуры, давления, напряженности электрического поля и других факторов имеет важное научное и техническое значение. Такие исследования, дающие возможность получить новые необходимые технике изоляционные материалы с заданными свойствами [1], активно проводятся сегодня [2-9].

В данной работе рассматривается волноводная конструкция (рис. 1) для исследования жидких диэлектриков в X-диапазоне частот. Конструкция состоит из двойного согласованного волноводного тройника и ступенчатого трансформатора сопротивления, соединенного с одним из коллинеарных плеч тройника. Источник электромагнитного излучения расположен в H-плече (порт 1). Через трансформатор сопротивления перпендикулярно широкой стенке волновода проходит силиконовая трубка, полностью заполненная жидким диэлектриком (рис. 1, а).

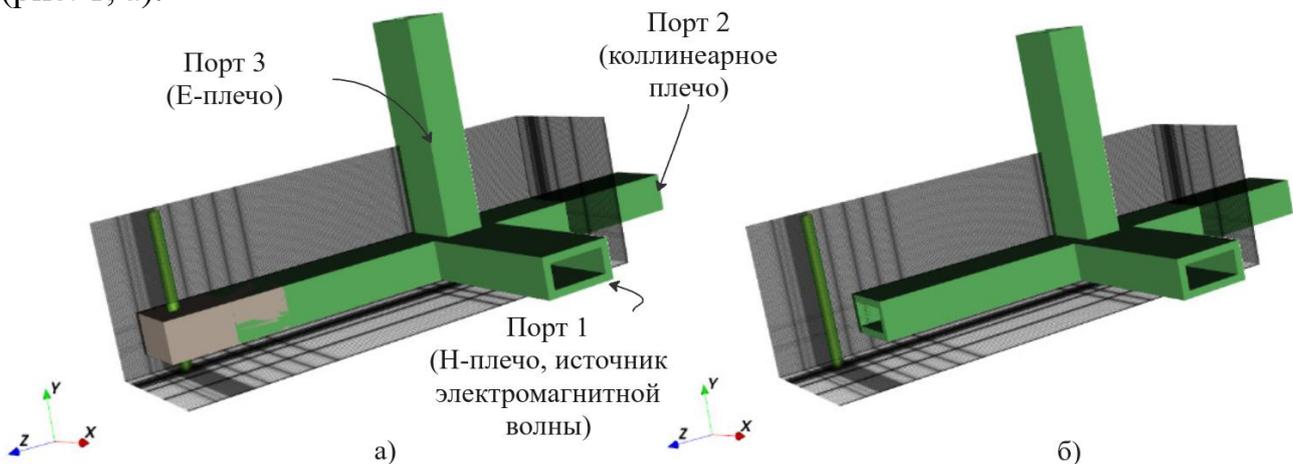


Рис. 1. 3D-изображение волноводной конструкции: а) конструкция в общем виде; б) без трансформатора.

Проведены экспериментальные измерения S-параметров с водным раствором хлорида натрия (NaCl) различной концентрации, полностью заполняющим трубку [10-13]. Также с помощью программного пакета OpenEMS [14-18] проведено численное моделирование S-параметров конструкций при различных значениях диэлектрической проницаемости. На рисунке 2 показаны  $S_{31}$ -параметры, полученные в результате численного моделирования и экспериментальных измерений. Видно, что с ростом значения диэлектрической проницаемости вещества в трубке, минимумы смещаются в область более низких частот (рис. 2, а). На экспериментальных данных наблюдается смещение резонансных минимумов

область высоких частот с ростом концентрации соли (рис. 2, б), что свидетельствует об уменьшении диэлектрической проницаемости водного раствора с повышением концентрации растворенной соли.

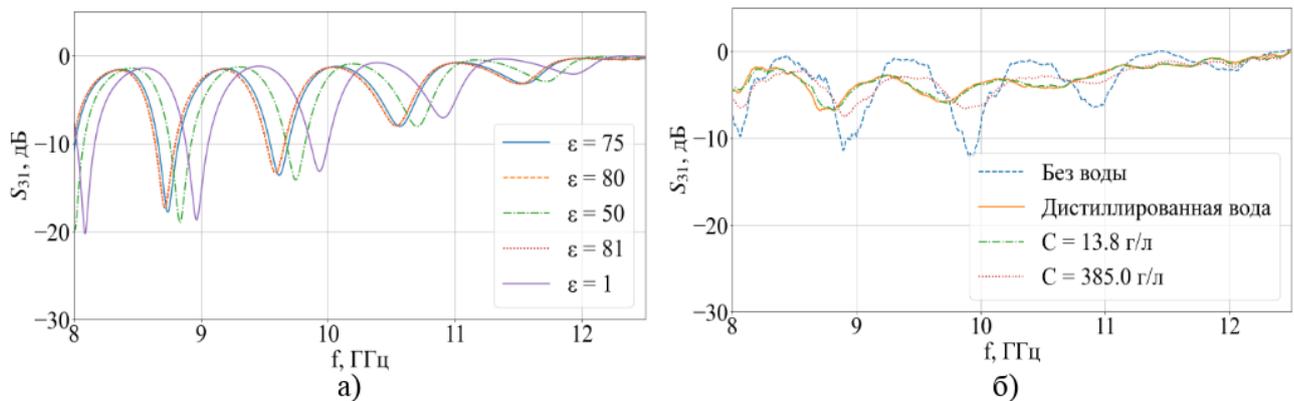


Рис. 2.  $S_{31}$ -параметры, полученные в результате: а) численного моделирования при различных значениях диэлектрической проницаемости материала; б) экспериментальных измерений при различной концентрации соли.

Таким образом, данная волноводная конструкция позволяет определять диэлектрическую проницаемость в широком диапазоне. Недостатком является сложность измерения при малом изменении диэлектрической проницаемости жидких диэлектриков.

#### Библиографический список

1. Брандт А.А. Исследование диэлектриков на сверхвысоких частотах. М.: Физ, 1963. 404 с.
2. Talmoudi O. et al. // 2024 4th International Conference on Innovative Research in Applied Science, Engineering and Technology (IRASET). IEEE, 2024. С. 1–5.
3. Eremenko Z.E. et al. // International Journal of Microwave and Wireless Technologies. 2020. V. 12 (9). Pp. 892-899.
4. Gulsu M.S. et al. // Sensors and Actuators A: Physical. 2020. V. 312. P. 112139.
5. Sim M.S. et al. // Sensors and Actuators A: Physical. 2024. P. 115322.
6. Михайлов А.И., Рябов Е.А., Сергеев С.А. // Физика волновых процессов и радиотехнические системы. 2022. Т. 25. № 3. С. 29–35.
7. Михайлов А.И., Рябов Е.А., Соколов С.Н. и др. // III научный форум телекоммуникации: теория и технологии ТТТ-2019. Казань, 2019. С. 222–224.
8. Хайрушев И.В. и др. // Электроника и микроэлектроника СВЧ. 2022. Т. 1. С. 546–549.
9. Рябов Е.А. и др. // Нанoeлектроника, нанофотоника и нелинейная физика. 2020. С. 223.
10. Сергеев С.А. и др. // Электроника и микроэлектроника СВЧ. 2019. Т. 1. С. 439–444.
11. Рябов Е.А. и др. // Взаимодействие сверхвысокочастотного, терагерцового и оптического излучения с полупроводниковыми микро- и наноструктурами, метаматериалами и биообъектами: сборник статей. – Саратов: Саратовский источник, 2019. С. 188–191.
12. Рябов Е.А., Короневский Н.В., Зыков К.А. и др. // Нанoeлектроника, нанофотоника и нелинейная физика: тез. докл. – Саратов: Техно-Декор, 2019. С. 214–216.
13. Рябов Е.А. и др. // Электроника и микроэлектроника СВЧ. 2021. С. 586–589.
14. Liebig T., Rennings A., Held S. et al. // International Journal of Numerical Modelling: Electronic Networks, Devices and Fields. 2013. V. 26(6). P. 680–696.
15. Рябов Е.А., и др. // Электроника и микроэлектроника СВЧ. 2022. Т. 1. С. 555–559.
16. Сергеев С.А., Гулманов Э.Э. и др. // В мире научных открытий. 2014. № 4(52). С. 148–160.
17. Сергеев С.А., Гулманов Э.Э. и др. // В мире научных открытий. 2015. № 8.1(68). С. 494.
18. Горин Д.А., Щукин Д.Г., Михайлов А.И. и др. // Письма в ЖТФ. 2006. Т. 32(2). С. 45–50.

# ИССЛЕДОВАНИЕ ДИНАМИКИ ЛИНЕЙНО СВЯЗАННЫХ ОСЦИЛЛЯТОРОВ НА ОСНОВЕ ФОРМАЛИЗМА ХОДЖКИНА-ХАКСЛИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ИСКУССТВЕННЫХ НЕЙРОННЫХ СЕТЕЙ

Э.Р. Багаутдинова<sup>1</sup>, П.В. Купцов<sup>1,2</sup>, Н.В. Станкевич<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Национальный исследовательский университет «Высшая школа экономики»,  
Нижний Новгород.

<sup>2</sup>Саратовский филиал ИПЭ им. В.А. Котельникова РАН  
E-mail: [bagautdinovaer@mail.ru](mailto:bagautdinovaer@mail.ru)

Данное исследование посвящено исследованию динамики линейно связанных осцилляторов с помощью искусственных нейронных сетей. В рамках нашего предыдущего исследования [1] было предложено использование искусственных нейронных сетей для моделирования осцилляторов, описываемых уравнениями типа Ходжкина-Хаксли. Эти модели воспроизводят процессы ионного транспорта через ионные каналы в мембранах различных типов клеток, включая нейроны, кардиомиоциты, бета-клетки поджелудочной железы и другие [2,3]. Исследование таких сетей имеет важное прикладное значение для медицины, поскольку позволяет лучше понять механизмы, лежащие в основе различных физиологических и патологических процессов.

Динамика линейного осциллятора описана моделью Шермана-Ринцеля [4], которая основана на формализме Ходжкина-Хаксли и имеет вид:

$$\begin{aligned} \tau \dot{V} &= -I_{Ca}(V) - \sum I_{Ki}(V, n) - I_S(V, S), \\ \tau \dot{n} &= \sigma(n_\infty(V) - n), \\ \tau_S \dot{S} &= S_\infty(V) - S. \end{aligned} \quad (1)$$

где  $V$  описывает мембранный потенциал,  $n$  – концентрация калия, а  $S$  – концентрация кальция. Функции

$$I_{Ca}(V) = g_{Ca} m_\infty(V)(V - V_{Ca}), \quad (2)$$

$$I_K(V, n) = g_K n(V - V_K), \quad (3)$$

$$I_S(V, n) = g_S S(V - V_K). \quad (4)$$

определяют три тока, проходящие через мембрану клетки, быстрый ток, создаваемый каналами кальция и калия и медленный от ионов калия. Уравнение для тока, проходящего через дополнительный канал калия с немонотонной характеристикой  $I_{K2}(V)$ , записывается следующим образом:

$$I_{K2}(V) = g_{K2} p_\infty(V)(V - V_K), \quad (5)$$

Функция, описывающая открытие ионных каналов в оригинальной модели, имеет следующий вид:

$$\omega_\infty(V) = [1 + \exp \frac{V_\omega - V}{\theta_\omega}]^{-1}, \quad \omega = m, n, S. \quad (6)$$

Однако, функция, описывающая открытие дополнительного ионного канала описывается немонотонной вероятностной характеристикой:

$$p_\infty = [\exp \frac{V - V_p}{\theta_p} + \exp \frac{V_p - V}{\theta_p}]^{-1}, \quad (7)$$

Дополнительное уравнение, учитывающее ток через специфический канал калия с немонотонной характеристикой, вводит бистабильность в систему, что может приводить к патологическим состояниям, связанным с дефектами коммуникации в сети клеток.

Для исследования глобальной динамики двух связанных систем — оригинальной и модифицированной с дополнительным калиевым каналом была введена линейная связь, описывающая двунаправленный транспорт ионов между клетками:

$$I_c(V^{(i)}) = \sum g_{c,V}(V^{(i)} - V^{(j)}). \quad (8)$$

где  $g_{c,V}$  - проводимость связи (сила связи). Таким образом, учитывается только электрическая связь между клетками.

Изменение силы связи между двумя осцилляторами приводит к переходам между различными режимами смешанных колебаний. Даже при низкой силе связи один осциллятор демонстрирует малоамплитудные колебания, а другой — крупноамплитудные всплески. Эта динамика воспроизводится как в математической модели, так и в нейросетевом отображении (Рис. 1). В дальнейших исследованиях планируется более детально изучить влияние других параметров модели, таких как нелинейные взаимодействия между осцилляторами и задержка связи, на устойчивость и переходы между различными режимами динамики.

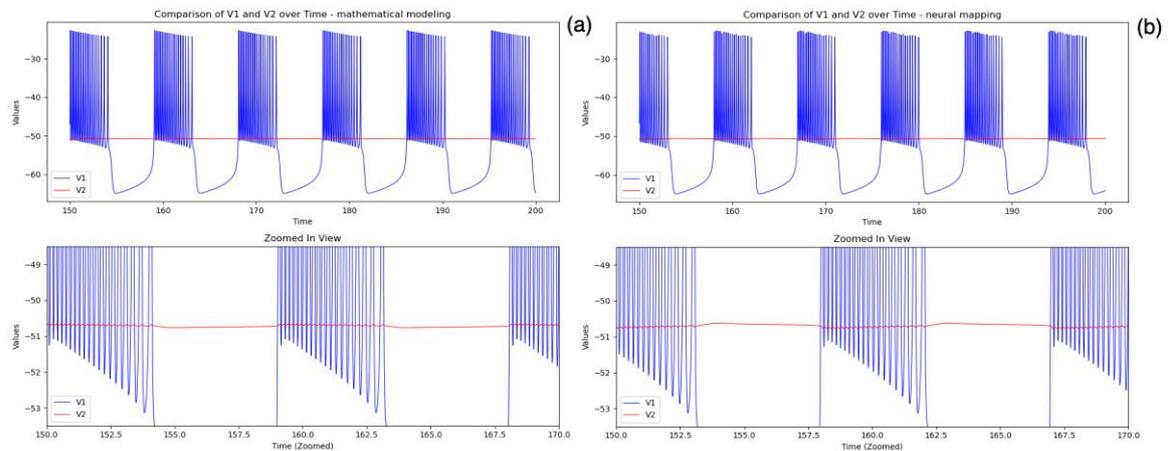


Рис. 1. Временные ряды для  $gK2=0.12$ ,  $Vp=-49.5$ ,  $\theta p=1.0$ ,  $VS=-36$ ,  $g_cV = 0.001$ .  
(a) Математическое моделирование. (b) Нейросетевое отображение.

*Работа выполнена при поддержке РФФ 20-71-10048-П.*

### Библиографический список

1. Kuptsov P.V., Stankevich N.V., Bagautdinova E.R. // Chaos, Solitons and Fractals. 2023.
2. Hodgkin A.L., Huxley A.F. // The Journal of Physiology. 1952. V. 116. P. 449–472.
3. Simms B.A., Zamponi G.W. // Neuron. 2014. V. 82, №. 1. P. 24–45.
4. Stankevich N., Mosekilde E. // Chaos. 2017. V. 27, №. 123101. P. 12.

## ПРОСТРАНСТВЕННАЯ ПЕРЕКАЧКА СПИНОВЫХ ВОЛН В СВЯЗАННЫХ МАГНОННЫХ КРИСТАЛЛАХ

В.В. Балаева, Д.В. Романенко, М.А. Морозова

Саратовский государственный университет им. Н. Г. Чернышевского

E-mail: Vkonda2000@mail.ru

Спиновые волны (СВ) являются перспективными носителями информации в будущих системах обработки сигналов, поскольку затухание Гильберта может быть значительно ниже тепловых потерь в электронных устройствах. Использование СВ позволяет создавать гораздо меньшие наноразмерные устройства как для аналоговой, так и для цифровой обработки данных. [1]

В работе исследуются латерально связанные структуры из железо-иттриевого граната ( $Y_3Fe_5O_{12}$ , ЖИГ) на основе сплошных ферромагнитных плёнок (ФП) и ФП с периодической системой канавок – магнонных кристаллов (МК), на поверхности которых нанесена периодическая структура.

Основной особенностью связанных структур является периодическая перекачка сигнала между волноводами в направлении распространения волны [2, 3]. На рис. 1 представлены зависимости длины перекачки мощности от ширины зазора между волноводами  $d$ . Как для обратных объёмных (ООМСВ, а), так и для поверхностных магнитоэлектрических волн (ПМСВ, б) зависимость  $\Lambda(d)$  является нелинейно возрастающей. Также видно, что длина перекачки прямопропорциональна ширине волноводов  $w$ .

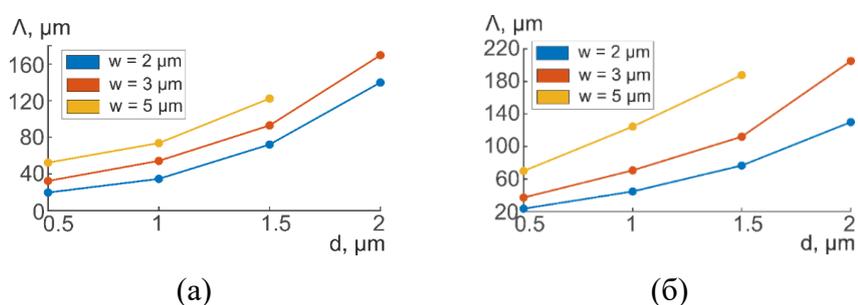


Рис. 1. Зависимости длины перекачки мощности от расстояния между волноводами  $d$  при разной ширине волноводов  $w$  для (а) ООМСВ, (б) ПМСВ.

Таким образом, полученные результаты позволяют рассматривать исследуемые связанные структуры в качестве функционального элемента для частотного разделения сигналов, в частности, за счёт наличия зон непропускания сигнала в магнонных кристаллах, делителя мощности, а также эффективного элемента межсоединений в магнонной сети.

Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда (грант № 23-79-30027).

### Библиографический список

1. Wang Qi et al. // Sci Adv 4 (1). 2018. e1701517.
2. Люиселл У. Связанные и параметрические колебания в электронике. М., 1963.
3. Damon R.W., Eshbach J.R. Magnetostatic modes of a ferromagnet slab // J. Phys. Chem. Solids. 1961. V. 19. P. 308–320.

## ДИФФУЗИОННАЯ НАКАЧКА ГРАФЕНА НА ЭКРАНИРОВАННОЙ ПОДЛОЖКЕ

А. С. Банникова<sup>1,2</sup>, М. Ю. Морозов<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Саратовский филиал ИРЭ им. В.А. Котельникова РАН

<sup>2</sup>Саратовский государственный университет им. Н.Г. Чернышевского  
e-mail: [mikkym@mail.ru](mailto:mikkym@mail.ru)

Уникальные свойства двумерного материала графена, такие как нулевая ширина запрещенной зоны и линейный энергетический спектр носителей заряда [1], делают графен привлекательным материалом на роль активной среды для ТГц лазеров [2]. Эффективность прямой оптической накачки графена достаточно мала [3]. В работе [4] был предложен метод диффузионной накачки графена, повышающий эффективность накачки графена, как показано в работе [5], более чем на порядок величины. При диффузионной накачке инверсия в графене создается за счет диффузии и захвата в графен носителей заряда из полупроводниковой подложки, в которой они создаются с помощью оптической накачки полупроводника.

В настоящей работе теоретически изучена диффузионная накачка экранированного графена. Исследуемая структура схематически представлена на вставке (а) на рисунке. Графен, помещенный на полупроводниковую подложку толщиной  $d$ , экранирован металлическим затвором. Излучение накачки нормально падает на структуру. Поскольку при прямой оптической накачке через графен захват в него составляет менее 2.3 % [5], мощность накачки преимущественно поглощается в подложке графена, генерируя носители заряда. Фотовозбужденные в подложке носители заряда диффундируют к графену и захватываются в него, создавая в графене инверсное по энергии распределение носителей заряда.

Концентрация электрон-дырочных в полупроводниковой подложке и графене рассчитывалась по уравнениям амбиполярной диффузии и захвата в графен носителей заряда с граничными условиями, соответствующими бесконечной скорости захвата носителей заряда на границе с графеном и отсутствию потока носителей заряда на противоположной стороне подложки. В структуре с металлическим экраном отсутствие потока носителей заряда в металл достигается изолирующим слоем между подложкой и металлом. В теоретической модели толщина изолирующего слоя считается пренебрежимо малой.

Численные расчеты были выполнены для структуры со следующими параметрами: диэлектрическая проницаемость подложки  $\varepsilon_s = 12.9$  (GaAs),  $\alpha$  – коэффициент поглощения мощности накачки  $1 \text{ мкм}^{-1}$ ,  $D_a$  – коэффициент амбиполярной диффузии  $20 \text{ см}^2/\text{с}$ ,  $\tau_{gr}$  – время жизни носителей заряда в графене  $5 \text{ пс}$ ,  $\tau_R$  – время рекомбинации носителей заряда в подложке  $5 \text{ нс}$ .

На рисунке представлена концентрация электрон-дырочных в графене в зависимости от толщины подложки для двух типов диффузионной накачки графена.

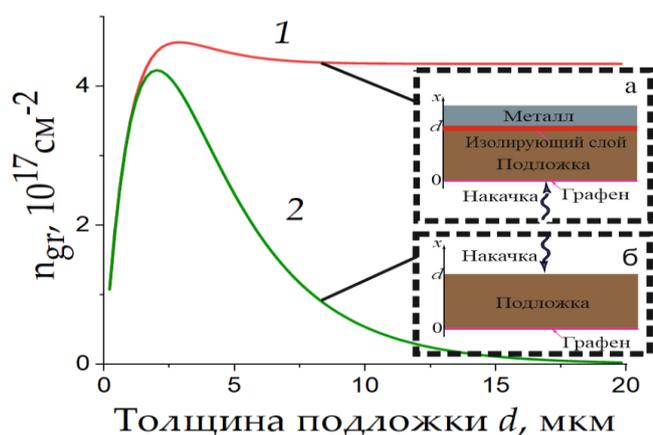


Рис.1. Концентрация носителей заряда в графене от толщины подложки при диффузионной накачке в структуре с экранированной подложкой (кривая 1), схематически показанной на вставке (а), и при диффузионной накачке графена в структуре без экрана (кривая 2), схематически показанной на вставке (б).

ложке графена, и как следствие, величина концентрации в графене мала. При толщине подложки порядка  $1/\alpha$  мощность накачки полностью поглощается в подложке, и величина концентрации носителей заряда в графене достигает своего максимального значения. При дальнейшем увеличении толщины подложки концентрация носителей заряда в графене в структуре без экрана монотонно убывает вследствие их рекомбинации в подложке. Для структуры с экранированной подложкой при толщинах подложки больших  $1/\alpha$  концентрация носителей заряда незначительно убывает вследствие их рекомбинации в подложке и выходит на стационарный уровень. В структуре с экраном носители заряда, сгенерированные накачкой, диффундируют вблизи облучаемого края подложки на расстояния, сравнимые с длиной диффузии в подложке  $L_a = \sqrt{D_a \tau_R}$ . При увеличении толщины подложки до значений больших  $L_a$  концентрация электрон-дырочных пар в графене выходит на стационарный уровень.

Таким образом, показано, что при диффузионной накачке графена на экранированной подложке величина концентрации носителей заряда при толщинах подложки, больших длины диффузии в подложке, близка к своему максимальному значению и не зависит от толщины подложки в отличие от диффузионной накачки графена в структуре без экрана.

*Исследование выполнено при поддержке РФФ (проект № 24-22-00114).*

### Библиографический список

1. K. S. Novoselov, et al. // Nature. 2012. Vol. 490. P. 192.
2. V. Ya. Aleshkin, A. A. Dubinov, V. Ryzhii // JETP Lett. 2009. Vol. 89. P. 63.
3. R. R. Nair, et al. // Science. 2008. Vol. 320. P. 1308.
4. A. R. Davoyan, et al. // Appl. Phys. Lett. 2013. Vol. 103. P. 251102.
5. M. Y. Morozov, et al. // Appl. Phys. Lett. 2015. Vol. 106. P. 061105.

Кривая 1 демонстрирует концентрацию носителей заряда в графене  $n_{gr}$  для диффузионной накачки в структуре с экранированной подложкой, а кривой 2 показана концентрация носителей заряда в графене при диффузионной накачке графена в структуре без экрана, рассмотренной в [5] и схематически показанной на вставке (б) на рисунке. При толщинах подложки, меньших длины поглощения мощности падающей оптической накачки, определяемой величиной  $1/\alpha$  только часть мощности накачки поглощается в под-

## ЗАКОНОМЕРНОСТИ ПРОТЕКАНИЯ ТОКА В ПЛЕНКАХ ПЕРФОРИРОВАННОГО ГРАФЕНА, ФУНКЦИОНАЛИЗИРОВАННОГО КАРБОНИЛЬНЫМИ И КАРБОКСИЛЬНЫМИ ГРУППАМИ

П.В. Барков<sup>1</sup>, М.М. Слепченков<sup>1</sup>, О.Е. Глухова<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Саратовский национальный исследовательский государственный университет имени Н.Г. Чернышевского, Саратов  
e-mail: [barkovssu@mail.ru](mailto:barkovssu@mail.ru)

Графен и его структурные модификации являются одними из наиболее перспективных современных наноматериалов для создания электронных устройств нового поколения [1]. С момента экспериментальной реализации графена Геймом и Новоселовым [2] актуальной задачей является открытие энергетической щели в графеновой зонной структуре. Бесщелевая природа графена не позволяет управлять током в канале полевых транзисторов, создаваемых на его основе. Для решения данной проблемы были предложены различные подходы. Одним из эффективных способов превращения графена из полуметалла в полупроводник является пробивание массива периодических наноотверстий высокой плотности в его листах. Получаемые подобным образом наноструктуры получили название перфорированного графена (ПГ). Теоретически было предсказано, что размер энергетической щели перфорированного графена можно настраивать путем варьирования их геометрических параметров, а именно ширины шейки (кратчайшее расстояние между соседними наноотверстиями), формы и диаметра наноотверстия, а также ориентации сетки (расположение наноотверстий вдоль направления «зигзаг» или вдоль направления «кресло») [3]. В реальных экспериментах по синтезу графена и его различных модификаций, включая ПГ, часто присутствуют различные примеси в виде кислород-содержащих групп [4,5]. Для работы наноэлектронных устройств на основе ПГ важно учитывать их влияние при расчете транспорта электронов и токовых характеристик. В данной работе проводится исследование влияния двух типов кислород-содержащих функциональных групп – гидроксильных (COOH) и карбонильных (C=O), на электронные транспортные свойства пленок ПГ.

Объектом исследования являлась пленка ПГ с почти круглыми отверстиями диаметром 1.2 нм. В рамках проводимых численных экспериментов присоединение функциональных групп происходило поэтапно на атомы по краям наноотверстия с использованием оригинальной методики моделирования [6].

Наша задача заключалась в том, чтобы установить влияние функциональных групп на закономерности протекания тока в ПГ с позиции его использования в качестве канала в полевых транзисторах. С этой целью нами были рассчитаны вольт-амперные характеристики (ВАХ) чистого ПГ и ПГ в присутствии функциональных групп. Расчеты проводились для двух направлений транспорта электронов: вдоль направления «зигзаг» и вдоль направления «кресло» гексагональной решетки графена. Рассчитанные токовые характеристики приведены на рис. 1. Из рисунка видно, что на ВАХ чистого ПГ присутствуют участки с отрицательным дифференциальным сопротивлением (ОДС) для обоих рассмотренных направлений транспорта электронов. Эффект появления подобных участков

ОДС на ВАХ был ранее установлен в работах Nguen et. al. [7] для структур ПГ, реализующих электронно-дырочный переход. По мнению исследователей он связан с наличием беспорядка в виде щелевой электронной структуры ПГ и объясняется появлением эванесцентных состояний в одной из зон электронной структуры (валентной зоны или зоны проводимости), на которые могут переходить носители заряда из другой зоны в результате туннелирования. Для случая транспорта электронов вдоль направления «зигзаг» эти участки выражены более явно по сравнению со случаем транспорта вдоль направления «кресло», что объясняется разной протяженностью ширины шейки в указанных направлениях, а, значит, и разной протяженностью области рассеяния при расчетах квантового транспорта. В частности, вдоль направления «кресло» она на 0.25 нм больше, чем вдоль направления «зигзаг». Кроме того, как было показано в работе [8], решетку ПГ можно рассматривать как сеть с множеством графеновых нанолент. Известно, что наноленты с конфигурациями края «зигзаг» и «кресло» сильно различаются по своим электронным свойствам. В частности, наноленты «зигзаг» имеет пик плотности электронных состояний, обусловленный вкладом локализованных краевых состояний, в то время как наноленты «кресло» на уровне Ферми обладают нулевой плотностью состояний [9]. Отмеченные различия между топологиями «зигзаг» и «кресло» гексагональной решетки графена приводят и к разной величине транспортной щели чистого ПГ в этих направлениях (в направлении «кресло» она составляет 2.5, в направлении «зигзаг» – 1.5). Результаты влияния СООН и С=О групп на токовые характеристики ПГ довольно сильно различаются между собой. Из рис. 1 видно, что функционализация ПГ группами СООН приводит к усилению эффекта ОДС на ВАХ, которое проявляется в увеличении расстояния от выступа до впадины профиля тока. В случае транспорта электронов вдоль направления «зигзаг» оно составляет 0.6 мкА (для чистого ПГ - 0.4 мкА), вдоль направления «кресло» – 0.8 мкА (для чистого ПГ - 0.2 мкА). Функционализация ПГ группами С=О не приводит к усилению эффекта ОДС. Более того, участок с ОДС малой протяженности появляется на ВАХ только при значениях напряжения смещения порядка 1 В для токопереноса в направлении «кресло» и порядка 1.5 В – 1.6 В для токопереноса в направлении «зигзаг». Для ПГ, функционализированного С=О группами участок ОДС формируются при меньших напряжениях, особенно в направлении токопереноса «кресло» (0.5 В – 0.8 В). Мала и величина расстояния от выступа до впадины для этого случая функционализации. Она составляет порядка 0.3 мкА для обоих направлений токопереноса. В целом можно говорить о том, что токовые характеристики ПГ, функционализированного С=О группами, близки по своему виду к характеристикам чистого ПГ.

Анализируя представленные графики, можно отметить, что независимо от того, содержит ли ПГ функциональные группы или нет, на ВАХ присутствует участок с отрицательным дифференциальным сопротивлением в области напряжений смещения 1.3 - 1.6 В. Этот же участок присутствовал на ВАХ ПГ, показанных на рис. 1, но при меньших значениях напряжения смещения. Следовательно, сформированные в графеновой решетке отверстия приводят к тому, что участок ОДС появляется при меньших напряжениях смещения, а присутствие

функциональных групп позволяет усиливать этот эффект, или ослаблять его. Выявленные закономерности формирования профиля ВАХ представляют интерес для создания туннельных диодов или диодов Ганна на основе пленок чистого и функционализированного ПГ.

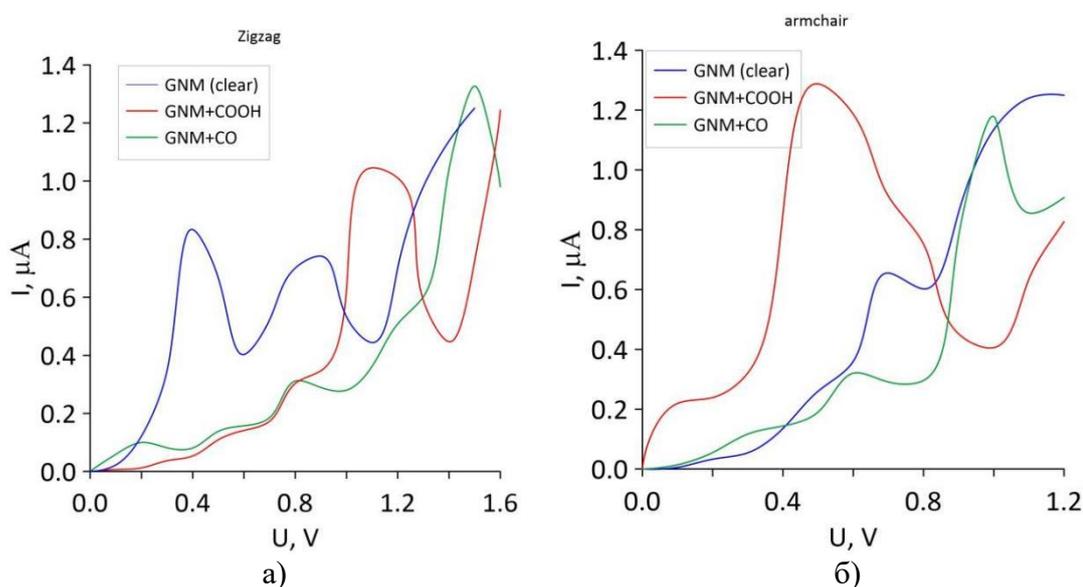


Рис. 1 – Вольт-амперные характеристики пленок чистого и функционализированного ПГ для случаев транспорта электронов вдоль направлений «зигзаг» (а) и «кресло» (б) гексагональной решетки графена.

*Работа выполнена при поддержке гранта РФФ № 23-72-01122.*

#### Библиографический список

1. Urade A.R., Lahiri I., Suresh K.S. // JOM. 2023. Vol. 75. P. 614–630.
2. Novoselov K.S., Geim A.K., Morozov S.V., et. al. // Science. 2004. Vol. 306. P. 666–669.
3. Oswald W., Wu Z. // Phys.Rev. B. 2012. Vol. 85. P. 115431.
4. Rabchinskii M.K., Ryzhkov S.A., Kirilenko D.A., et.al. // Sci. Rep. 2020. Vol. 10. P. 6902.
5. Koh K.H., Bagherzadeh Mostaghimi A.H., Chang Q., et.al. // EcoMat. 2023. Vol. 5. P. e12266.
6. Glukhova O.E., Barkov P.V. // Lett. Mater. 2021. Vol. 11. P. 392–396.
7. Nguyen V.H., Bournel A., Dollfus P. // J. Appl. Phys. 2011. Vol. 109. P. 093706.
8. Nguyen V.H., Mazzamuto F., Saint-Martin J. // Nanotechnology. 2012. Vol. 23. P. 065201.
9. Kobayashi Y., Kusakabe K., Fukui K., et.al. // Physica E: Low-Dimensional Systems and Nanostructures. 2006. Vol. 34. P. 678–681.

## АНАЛИЗ КИНЕТИКИ КРИСТАЛЛИЗАЦИИ ТОНКИХ ПЛЕНОК ФАЗОИЗМЕНЯЕМЫХ МАТЕРИАЛОВ

**А.А. Бурцев, А.А. Невзоров, В.А. Михалевский, А.В. Киселев, В.В. Ионин,  
А.А. Лотин**

*Национальный исследовательский центр «Курчатовский институт»*

*E-mail: [murrkiss2009@yandex.ru](mailto:murrkiss2009@yandex.ru)*

Фазоизменяемые материалы (ФИМ) представляют собой соединения, обладающие несколькими стабильными фазовыми состояниями (аморфное и одно или несколько кристаллических) [1, 2]. Наиболее важной особенностью этого класса материалов является способность многократно и быстро переключаться между этими состояниями через нагрев до температур фазовых переходов [1]. Концепция использования фазовых состояний ФИМ в качестве логических «1» и «0» и переключения между этими состояниями были широко изучены для хранения данных [3, 4]. Наиболее популярными и распространенными являются материалы линии Н. Ямады, представляющие сплавы теллуридов  $\text{GeTe-Sb}_2\text{Te}_3$  [5]. Широкое применение нашел сплав  $\text{Ge}_2\text{Sb}_2\text{Te}_5$  (GST) благодаря низкой температуре кристаллизации и плавления, что обеспечивает высокую скорость переключения фазы и энергетическую эффективность. Теллурид германия GeTe обладает высокой термической стабильностью, что позволяет рассматривать его как альтернативу GST в областях, где необходима работа при более высоких температурах [6].

Необходимо иметь полное представление о процессах фазового превращения, что позволит осуществить точное управление фазовым состоянием активных ячеек ФИМ и, как следствие, их оптическими и электрофизическими свойствами при отладке и оптимизации устройств. В качестве примера простой аналитической модели можно привести анализ прогрева материала на основе уравнения теплопроводности [7]. Для оценки кинетики фазовых переходов на протяжении многих лет применялся формализм на основе теории Колмогорова — Джонсона — Мэла — Аврами (КДМА) [8, 9]. Обычно кристаллизация включает механизмы нуклеации (зародышеобразования) и роста: сначала образуются небольшие кристаллические зародыши, которые впоследствии растут. Образование зародышей может происходить на поверхности/границе раздела и/или в объеме материала. На практике удобнее оценивать долю образовавшейся кристаллической фазы и затем проводить анализ кинетических особенностей материала (с преобладанием стохастической нуклеации или роста кристаллитов, соответственно).

В представленной работе представлены результаты теоретического анализа кристаллизации тонких пленок фазоизменяемых материалов GeTe и  $\text{Ge}_2\text{Sb}_2\text{Te}_5$  под действием импульсного лазерного излучения наносекундной длительности. Профиль интенсивности воздействующего импульса был близок к равномерному распределению энергии по поверхности образца («top hat»), эффективность применения которого была ранее продемонстрирована в работе [10]. Изменение фазового состояния и оценка доли кристаллической фазы проводились на основе изменения коэффициента оптического отражения зондирующего излучения от

поверхности образца пленки. Измерение показателя отражения эффективно при оценке фазового перехода, в частности, по его динамике возможно точно определить долю образовавшейся новой фазы и прогресс кристаллизации [1, 11]. На основе формализма КДМА были определены постоянные Аврами. Показано, что исследуемые материалы различаются по кинетическим свойствам [12]. Теллурид германия GeTe демонстрирует высокую скорость роста и интенсивное зародышеобразование. Сплав GST демонстрирует изменение постоянной Аврами, что может быть связано с высокой степени стохастичности при преобладании в кристаллизации зародышеобразования.

*Работа проведена в рамках выполнения государственного задания ФГБУ «Национальный исследовательский центр «Курчатовский институт» в части получения пленок и экспериментального исследования их свойств, а также договора № 075-15-2023-324 в части теоретического анализа фазовых переходов.*

### Библиографический список

1. Raoux S., Wuttig M. Phase Change Materials. Science and Applications. Springer Science+Business Media. 2009. 845 p.
2. Kolobov A.V., Tominaga J. Chalcogenides: Metastability and Phase Change Phenomena. Springer-Verlag Berlin Heidelberg. 2012. 287 p.
3. Wuttig M., Yamada N. //Nature materials. 2007. V. 6. №. 11. Pp. 824-832.
4. Sarwat S.G. //Materials science and technology. 2017. V. 33. №. 16. Pp. 1890-1906.
5. Guo P., Sarangan A.M., Agha I. //Applied sciences. 2019. V. 9. №.3. P. 530.
6. Singh K., Kumari S., Singh H., Bala N., et al. //Applied Nanoscience. 2023. V. 13. №. 1. Pp. 95-110.
7. Eliseev N.N., Kiselev A.V., Ionin V.V., Mikhalevsky V.A., et al. // Results in Physics. 2020. V. 19. P. 103466.
8. Колмогоров А.Н. // Известия Российской академии наук. Серия математическая. 1937. Т. 1. №. 3. С. 355-359.
9. Avrami M. //The Journal of chemical physics. 1940. V. 8. №. 2. Pp. 212-224.
10. Kiselev A.V. Ionin V.V., Burtsev A.A., Eliseev N.N., et al. //Optics & Laser Technology. 2022. V. 147. P. 107701.
11. Weidenhof V., Friedrich I., Ziegler S., & Wuttig M. //Journal of applied physics. 2001. V. 89. №. 6. Pp. 3168-3176.
12. Burtsev A.A., Ionin V.V., Kiselev A.V., Eliseev N.N., et al. // Advanced Laser Technologies: Book of abstracts the 28th International Conference. 2021. Pp. 81.

## КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ СТРУКТУРЫ ЛАЗЕРНО-ИНДУЦИРОВАННОЙ ГРАФИТИЗИРОВАННОЙ ОБЛАСТИ В АЛМАЗЕ

Д.Н. Бухаров, С.М. Лаврентьев

*Владимирский государственный университет им. А. Г. и Н. Г. Столетовых*

*E-mail: buharovdn@gmail.com*

Сегодня материалы из искусственного алмаза являются перспективной элементной базой для разработки широкого спектра инновационных датчиков и сенсоров [1]. Для создания элементов для таких приборов удобно применять метод локальной лазерной графитизации искусственного алмаза в случае движущегося лазерного источника [2].

Для оценки влияния параметров лазерной схемы на образцы до их реального синтеза применим аппарат компьютерного моделирования областей графитизации, например, как диффузионных фрактальных структур.

Такая модель была реализована в среде MATLAB итерационный процесс в рамках клеточного автомата с окрестностью Неймана [4], описывающего переход ячеек расчетной области из класса свободных в класс графитизированных. Основным параметром модели – вероятность этого перехода ( $p$ ), которая представляла собой параметр, обеспечивающий связь модели и экспериментальной схемы синтеза.

Эта вероятность оценивалась в зависимости от температуры ( $T$ ) ячейки расчетной области как  $p \sim T/S$  ( $S$  – площадь расчетной области) и была связана со скоростью движения пучка лазерного излучения ( $v$ ). Величина этой скорости определяла начальное пространственное распределение областей графитизации в моделируемой системе: если  $v$  полагалось ниже заданного критического значения ( $v_c$ ), то начальная область графитизации задавалась связной непрерывной структурой, иначе – выбиралась несвязная система удаленных друг от друга областей.

На рис. 1а,б приведены результаты моделирования для изотермической расчетной области для разных скоростей движения пучка лазерного излучения. В этом случае (рис 1б) ширина области графитизации была примерно одинаковая на всем своем протяжении.

На рис. 1в изображена модель области графитизации с подоблостями с различными температурами: в центре – большая, на периферии – меньшая. Для такого случая область графитизации обладала неодинаковой шириной: большей в центре и меньшей на периферии, соответственно.

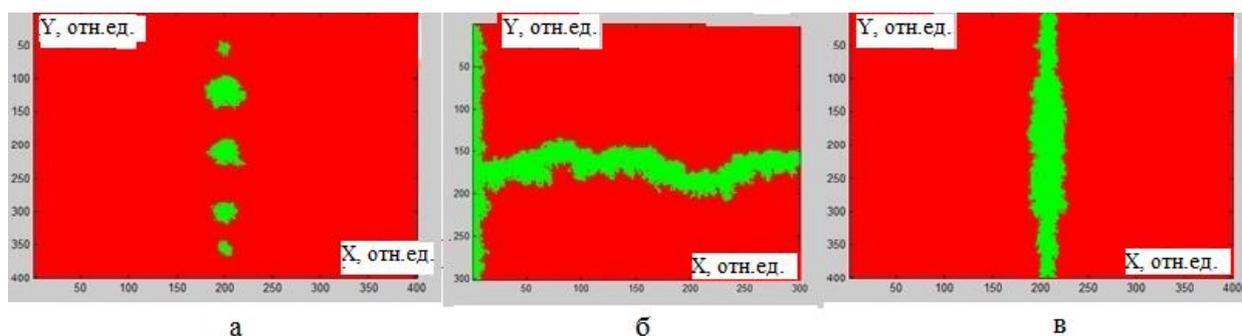


Рис. 1. Модели области графитизации при  $p=0.5$ ,  $v_c=34$  мкм/с,  $T=500$ : несвязная область при  $v=100$  мкм/с (а), связная область при  $v=20$  мкм/с (б), случай области с варьирующейся  $p$ :  $p=0.6$  в центре ( $100 < Y < 300$  отн. ед.), в остальной части  $p=0.5$ .

Модели сравнивались с экспериментальными образцами [2], полученными лазерными методами: оценивалась разница фрактальных размерностей с использованием метода boxcounting [5]. Эта разница была не велика, не более 10%, что свидетельствовало о хорошей точности моделирования.

Таким образом, предложенная модель графитизации позволяет производить связь модельных параметров и экспериментальной схемы, а также применима для описания геометрических особенностей, образцов синтезированных лазерными методами.

*Работа выполнена в рамках государственного задания в сфере научной деятельности Министерства науки и высшего образования Российской Федерации FZUN-2024-0018.*

#### Библиографический список

1. Zalieckas, J., Greve, M.M., Bellucci L. et al., // Commun Chem. 2024. V 7(101). Pp.1 - 10.
2. Kononenko, T. V., Zavedeev, , Kononenko E. V. et al., // Applied Physics. 2015. V. 119. Pp. 405-414.
3. Konov V.I., Kononenko T.V., Kononenko V.V. // Optical Engineering of Diamond. 2013. Pp.385-444.
4. Zaitsev D. A. // Theoretical Computer Science. 2017. V. 666. Pp. 21-35.
5. Jundong Y., Yuanyuan S., Shanshan C., et al., // Journal of Applied Analysis & Computation. 2016. V. 6(4). Pp. 1114-1125.

## МОДЕЛИРОВАНИЕ СТРУКТУРЫ СИСТЕМЫ МИКРОСВИТКОВ ДИОКСИДА ТИТАНА, ДОПИРОВАННОГО ЗОЛОТЫМИ НАНОЧАСТИЦАМИ

**Д.Н. Бухаров, В.Д. Самышкин, А.Ф. Лелекова**

*Владимирский государственный университет им. А. Г. и Н. Г. Столетовых*

*E-mail: buharovdn@gmail.com*

Образцы из микротрубок диоксида титана являются перспективными материалами для создания инновационных приборов современной микроэлектроники и фотоники. Такое их применение становится возможным благодаря наличию у них уникальных оптических и электрофизических свойств [1].

Простым удобным методом синтеза структур микросвитков является лазерный синтез пористой пленки диоксида титана на стеклянную подложку с допированием наночастицами золота и последующим скручиванием свитков за счет пошагового воздействия микролезвия на образец [2].

Полученные образцы микротрубок обладали не сильно разветвленной дендритной структурой с фрактальными размерностями порядка 1.75. Оценка фрактальных размерностей производилась в среде MATLAB для изображений образцов с использованием метода boxcounting [3].

Для оценки геометрических свойств перспективных образцов, до проведения их экспериментального синтеза была разработана имитационная модель структуры микросвитков в приближении диффузионно-ограниченной агрегации (DLA) [4]. Выбор модельного приближения был обусловлен качественным совпадением модельных структур и сходством фрактальных размерностей.

Модель DLA была реализована в среде MATLAB как итерационный процесс случайного блуждания модельной частицы по расчетной области с наложенной равномерной сеткой с последующей агрегацией с заданной вероятностью с сформированной ранее структурой в рамках клеточного автомата с окрестностью Неймана [5]. Основным параметром модели – вероятностью агрегации ( $p$ ), которая представляла собой параметр, влияющий на степень разветвления модельной структуры и в перспективе задающий имитационную связь модели и экспериментальной схемы синтеза. Кроме этого в модели учитывалась концентрация наночастиц золота, как один из основных параметров, оказывающих влияние на свойства (например, электропроводимость) образца.

На рис. 1 приведен синтезированный образец (рис. 1а) и результаты моделирования его структуры при различной концентрации золотых наночастиц (с)(рис. 1б, рис. 1в) в относительных единицах. Переход к абсолютным единицам позволил сравнить длины модельных структур и образцов, полученных в эксперименте. Так, например, для рис. 1б, в случае масштабного коэффициента, порядка среднего диаметра микросвитка (10 мкм), получим абсолютные длины модельных образцов, не превосходящие 2,5 мм, что не противоречит средним оценкам для образцов, полученных в эксперименте.

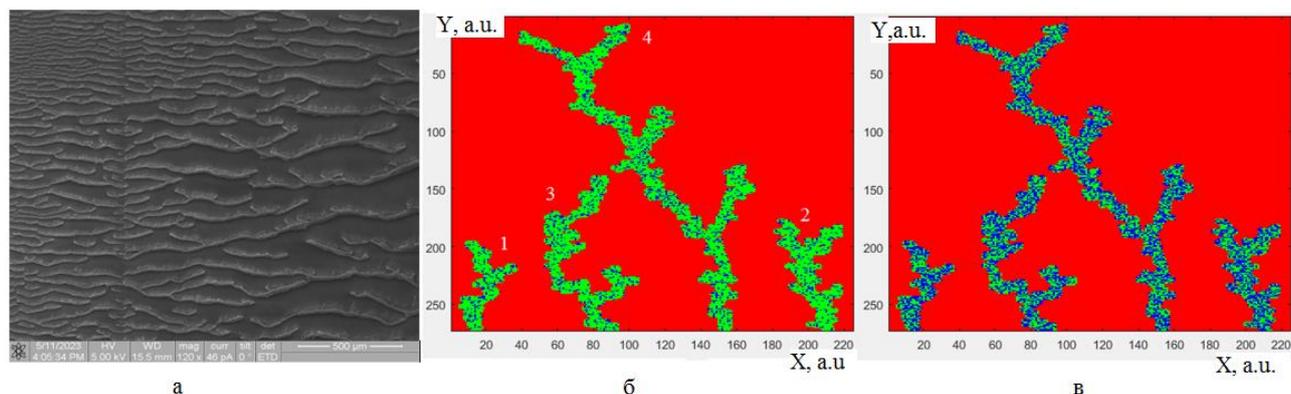


Рис. 1. Система микровитков: экспериментальный образец (а), DLA модели: фигуры 1, 2 получены при  $p=0.3$ , фигура 3 при  $p=0.6$ , фигура 4 при  $p=0.8$ , при  $c=20\%$  (а),  $c=70\%$  (в). Синим цветом отмечены модельные частицы из золота.

Также, модели сравнивались с экспериментальными образцами на основании оценки разницы фрактальных размерностей. Так, фрактальная размерность модели (рис.1а,б) составила величину 1.79. Таким образом, относительная погрешность модели составила величину не более 3%, что демонстрирует достаточно хорошую адекватность предложенного приближения.

Таким образом, рассмотренное имитационное модельное приближение может быть успешно использовано для описания геометрических особенностей, образцов микровитков диоксида титана.

*Работа выполнена в рамках гранта РФФ № 23-29-10016.*

#### Библиографический список

1. Rempel A.A., Valeeva A.A., Vokhmintsev A.S. et al. // Chem. Rev. 2021. V 90 (11). Pp. 1397-1414
2. Kavokina, S.; Samyshkin, V.; Cao, J. et al. // Nanomaterials. 2024. V 14(56). Pp. 1-10.
3. Gonzato, G. A. // Computers & Geosciences. 1998. V 24(1). Pp. 95-100.
4. Mroczka, J., Woźniak M., Onofri F.R.A. // Metrol. Meas. Syst. 2012. V XIX(3). Pp. 459-470.
5. Zaitsev D. A. // Theoretical Computer Science. 2017. V. 666. Pp. 21-35.

# ИССЛЕДОВАНИЕ НЕСТАЦИОНАРНОСТИ ВАРИАБЕЛЬНОСТИ СЕРДЕЧНОГО РИТМА У ЗДОРОВЫХ ДОБРОВОЛЬЦЕВ И ПАЦИЕНТОВ С НАРУШЕНИЕМ ВЕГЕТАТИВНОЙ РЕГУЛЯЦИИ КРОВООБРАЩЕНИЯ

**Д.В. Васильева**

*Саратовский национальный исследовательский государственный университет*

*им. Н.Г. Чернышевского*

*E-mail: darenka.www@gmail.com*

Сердечно-сосудистая система человека (ССС) адаптируется к внешним факторам и различным условиям, воздействующим на организм человека [1]. Такая работа сердца человека обеспечивается вегетативной регуляцией кровообращения [1]. Для изучения работы вегетативной регуляции анализируют вариабельность сердечного ритма (ВСР) [2]. Для анализа ВСР применяют стандартные методы, такие как временной анализ, частотный анализ, автокорреляционный анализ [2]. Реже используют методы нелинейной динамики, основанные на анализе нестационарности ВСР [3-5], математическом моделировании [6, 7] и исследовании взаимодействия контуров вегетативной регуляции кровообращения [8-16].

В данной работе проводится оценка количественных индексов нестационарности ВСР для скрининга типа нарушения функции вегетативной регуляции кровообращения. Анализировались четыре группы испытуемых: 10 здоровых добровольцев без патологии контуров вегетативной регуляции кровообращения ( $33 \pm 5$  лет); 63 пациента с артериальной гипертензией в положении лежа; 63 пациента с артериальной гипертензией в положении стоя ( $47 \pm 8$  лет); 10 пациентов с хронической сердечной недостаточностью ( $59 \pm 17$  лет); 3 пациента с дегенеративным поражением сердца в результате операции по трансплантации сердца ( $59 \pm 17$  лет).

Для каждого испытуемого проводился анализ последовательности RR-интервалов и рассчитывались четыре показателя нестационарности ВСР: среднеквадратическое отклонение последовательности RR-интервалов ( $\sigma$ ) [2]; время до первого нулевого значения коэффициента автокорреляции последовательности RR-интервалов ( $CC_0$ ) [2]; критерий  $\chi^2$  различия одномерных распределений последовательности RR-интервалов [17]; Евклидово расстояние между векторами коэффициентов уравнения регрессии последовательностей RR-интервалов ( $d$ ) [17]. Для проверки различий распределении выборок групп испытуемых используется U-теста Манна–Уитни [18].

На рисунке 1(а) представлены результаты количественной оценки стандартного отклонения  $\sigma$  для каждой группы испытуемых. Здоровые добровольцы, не имеющие нарушений вегетативной регуляции сердечно-сосудистой системы, имеют наибольшее значение стандартного отклонения  $\sigma$  -  $0.06(0.05;0.08)$  с. У больных хронической сердечной недостаточностью, имеющих дисфункцию контуров барорефлекторной регуляции, наблюдается значение стандартного отклонения  $\sigma$  -  $0.05(0.03;0.06)$  с. Больные с денервированным сердцем полностью лишены барорефлекторной регуляции, поэтому у них также наблюдается самые низкие из сопоставляемых групп значения стандартного отклонения  $\sigma$  -

0.03(0.02;0.04) с. Используя U-критерий Манна-Уитни, в ходе удалось статистически значимо отличить выборки значений стандартного отклонения  $\sigma$  группы пациентов с денервированным сердцем от здоровых добровольцев с уровнем значимости  $p < 0.05$ .

На рисунке 1(б) представлены результаты количественной оценки времени до первого нулевого значения коэффициента автокорреляции последовательности RR-интервалов ( $CC_0$ ). Значение  $CC_0$  для выборки здоровых добровольцев составляет 2.0(1.8;4.3) с. У пациентов с денервированным сердцем автокорреляционная функция быстрее всего снижается до нуля – 0.5(0.5;6.9) с. Результат согласуется с работой авторов [12], которые пришли к выводу, что «нарушение барорефлекса способствует линейаризации сердечного ритма». Наиболее медленно автокорреляционная функция снижается до нуля у пациентов с хронической сердечной недостаточностью – 4.4(3.3;15.0) с. Можно сделать вывод, что стационарность последовательности RR-интервалов увеличивается в результате нарушения барорефлекторной регуляции сердечного ритма. Используя U-критерий Манна-Уитни, в ходе работы удалось статистически значимо отличить выборки значений  $CC_0$  здоровых добровольцев от пациентов с трансплантацией сердца и хронической сердечной недостаточностью с уровнем значимости  $p < 0.01$ .

На рисунке 1(с) представлены результаты количественной оценки критерия  $\chi^2$  для последовательности RR-интервалов. Значение критерия  $\chi^2$  для выборки здоровых добровольцев составляет 33.8(21.4;39.6). Наибольшее значение критерия  $\chi^2$  демонстрируют пациенты с хронической сердечной недостаточностью – 49.8(32.2;64.2). Результат согласуется с работой авторов [19] о том, что у пациентов с хронической сердечной недостаточностью наблюдается сильная динамическая стационарность последовательности RR-интервалов в результате нарушения барорефлекторной регуляции. Наименьшее значение критерия  $\chi^2$  демонстрируют пациенты с денервацией сердца – 6.5(3.8;11.2). В результате анализа удалось статистически значимо различить выборочные значения критерия  $\chi^2$  групп больных с хронической сердечной недостаточностью и больных с артериальной гипертензией в положениях стоя и лежа с использованием U-критерия Манна-Уитни с уровнем значимости  $p < 0.05$ .

На рисунке 1(д) представлены результаты оценки коэффициента  $d$  для каждой группы испытуемых. Значение коэффициента  $d$  для выборки здоровых добровольцев составляет 0.0056(0.0046;0.0001). Здоровые добровольцы имеют самое высокое значение коэффициента  $d$ , что демонстрирует высокую ВСП и сильную нестационарность последовательности RR-интервалов. Наименьшее значение коэффициента  $d$  демонстрируют пациенты с денервированным сердцем 0.0004(0.0002;0.0006) и пациенты с хронической сердечной недостаточностью 0.0004(0.0002;0.0006). Эти результаты показывают, что пациенты с трансплантацией сердца и пациенты с хронической сердечной недостаточностью имеют низкую ВСП и высокую стационарность сигналов последовательности RR-интервалов. В ходе работы удалось статистически значимо отличить выборки значений коэффициента  $d$  из группы пациентов с артериальной гипертензией от

пациентов с хронической сердечной недостаточностью и от пациентов с трансплантацией сердца с использованием U-критерия Манна-Уитни с уровнем значимости  $p < 0.01$ .

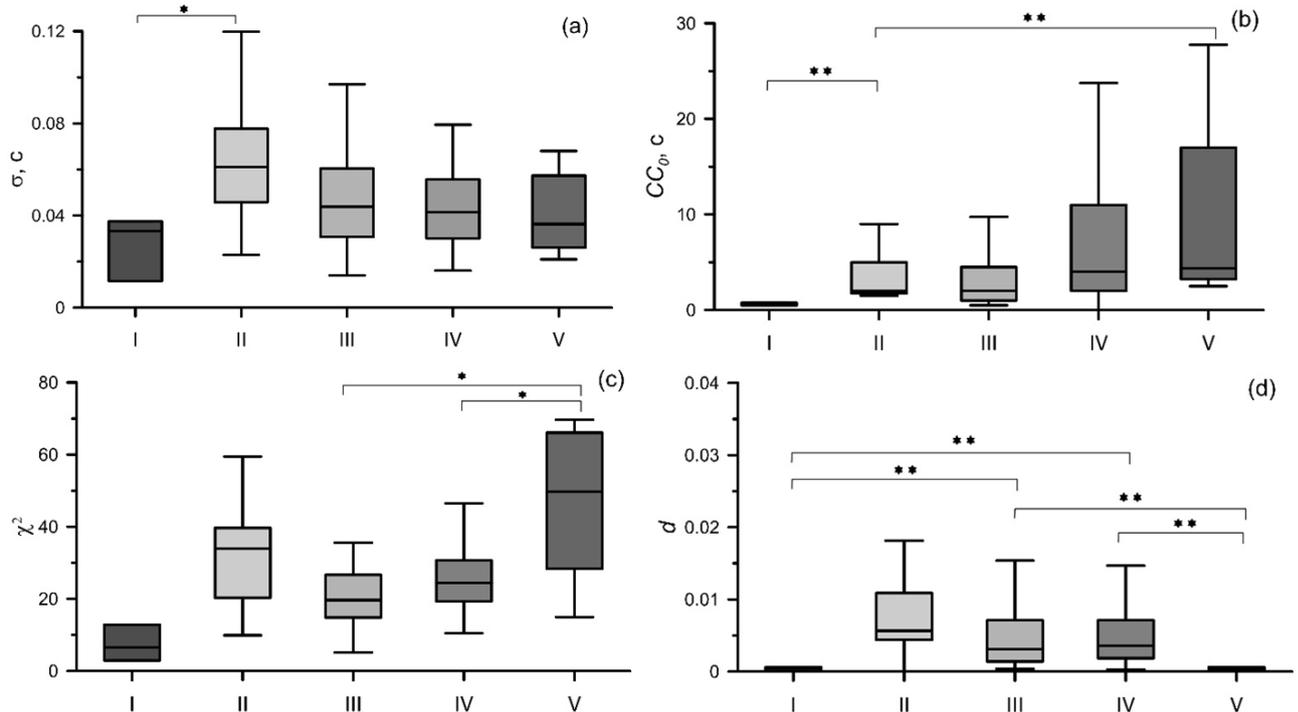


Рис. 1. (а) Результаты анализа нестационарности ВСР: (а) стандартное отклонение последовательности RR-интервалов  $\sigma$ ; (б) время до первого нулевого значения коэффициента автокорреляции последовательности RR-интервалов  $CC_0$ ; (в) критерий  $\chi^2$  различия одномерных распределений последовательности RR-интервалов; (г) Евклидово расстояние между векторами коэффициентов уравнения регрессии последовательностей RR-интервалов  $d$ . Экспериментальные выборки: I – пациенты после трансплантации сердца; II – здоровые добровольцы; III – пациенты с артериальной гипертензией в положении лежа; IV – пациенты с артериальной гипертензией в положении стоя; V – пациенты с хронической сердечной недостаточностью. Для диаграмм размахов границы блоков и линия внутри соответствуют первому, третьему квартилям и медиане распределения; усы диаграммы отмечают минимальное и максимальное значения по выборке. Звездочки соответствуют  $p$ -уровню значимости межгрупповых различий, оцененному с помощью U-критерия Манна-Уитни: \*\*  $p < 0.01$ ; \*  $p < 0.05$ .

В данной работе получены результаты, свидетельствующие о том, что сравниваемые методы анализа нестационарности демонстрируют коррелированные результаты и дополняют друг друга, предоставляя различную информацию о барорефлекторном контроле сердечного ритма. С помощью выбранных методов удалось выделить наиболее чувствительные показатели нестационарности для скрининга типа дисфункции вегетативной регуляции кровообращения. Удалось статистически значимо дифференцировать выборки испытуемых с помощью U-критерия Манна-Уитни. Показана возможность скрининга типа дисфункции вегетативной регуляции кровообращения с помощью анализа нестационарности ВСР.

*Работа выполнена в рамках проекта РФФ N 23-12-00241*

## Библиографический список

1. *S.K. Subramanian, V.K. Sharma, V. Arunachalam, R.Rajendran, A. Gaur* // *Front. Physiol.* 2019. V. 10. N. 1043.
2. Task Force of the European Society of Cardiology the North American Society of Pacing Electrophysiology Heart rate variability: standards of measurement, physiological interpretation and clinical use. *Circulation.* 1996. V. 93. N. 5, P. 1043-1065.
3. *A.L. Goldberger* // *Lancet.* 1996. V. 347. N. 9011. P. 1312–1314. 1996.
4. *A. Porta, M. Di Rienzo, N. Wessel, J. Kurths* // *Philos. Trans. A Math. Phys. Eng. Sci.* 2009. V. 367. N. 1892. P. 1215–1218.
5. *A. Voss, S. Schulz, R. Schroeder, M. Baumert, P. Caminal* // *Philos. Trans. A Math. Phys. Eng. Sci.* 2009.V. 367. N. 1892. P. 277–296.
6. *Y.M. Ishbulatov, A.S. Karavaev, A.R. Kiselev, V.I. Ponomarenko, and M.D. Prokhorov* // *Third Annual Symposium Optics and Biophotonics.* 2016. V. 9917. P. 99173N.
7. *Y.M. Ishbulatov, A.S. Karavaev, V.I. Ponomarenko, B.P. Bezruchko, M.D. Prokhorov* // *Bulletin of the Russian Academy of Sciences: Physics.* 2016. V. 90. N. 2. P. 180-185.
8. *A.S. Караваяев, А.Е. Руннова, Е.И. Боровкова, Ю.М. Ишбулатов, В.С. Хорев, А.Р. Киселев, М.О. Журавлев, В.И. Пономаренко, М.Д. Прохоров, Б.П. Безручко, А.А. Короновский* // *Са-ратовский научно-медицинский журнал.* 2016. V. 4. P. 541.
9. *A.S. Karavaev, V.V. Skazkina, Y.M. Ishbulatov, E.I. Borovkova* // *Cybernetics and Physics.* 2019. V. 8. N. 3. P. 128-131.
10. *M.D. Prokhorov, E.I. Borovkova, A.N. Hramkov, E.S. Dubinkina, V.I. Ponomarenko, Yu.M. Ishbulatov, A.V. Kurbako, A.S. Karavaev* // *Applied Sciences.* 2023. V. 14. P. 8390.
11. *E.I. Borovkova, A.N. Hramkov, E.S. Dubinkina, V.I. Ponomarenko, B.P. Bezruchko, Y.M. Ishbulatov, A.V. Kurbako, A.S. Karavaev, M.D. Prokhorov* // *The European Physical Journal. Special Topics.* 2023. V. 5. P. 625.
12. *О.С. Панина, А.Р. Киселев, Е.И. Боровкова, Ю.В. Черненко, В.В. Сказкина, В.И. Гриднев, Е.Н. Муреева, А.С. Караваяев* // *Российский вестник перинатологии и педиатрии.* 2018. T. 63. N. 4. С. 52-57.
13. *E.I. Borovkova, M.D. Prokhorov, A.R. Kiselev, A.N. Hramkov, S.A. Mironov, M.V. Agaltsov, V.I. Ponomarenko, A.S. Karavaev, O.M. Drapkina, T. Penzel* // *Frontiers in Network Physiology.* 2022. V. 2. P. 942700.
14. *A.S. Karavaev, V.V. Skazkina, E.I. Borovkova, M.D. Prokhorov, A.N. Hramkov, V.I. Ponomarenko, A.E. Runnova, V.I. Gridnev, A.R. Kiselev, T. Penzel.* // *Frontiers in Neuroscience.* 2022. V. 15. P. 791510.
15. *V.I. Ponomarenko, A.S. Karavaev, M.D. Prokhorov, E.I. Borovkova, A.N. Hramkov, T. Penzel, A.R. Kiselev* // *Chaos.* 2021. T. 31. V 7. P. 073105.
16. *A.S. Karavaev, M.D. Prokhorov, V.I. Ponomarenko, A.R. Kiselev, V.I. Gridnev, E.I. Ruban, B.P. Bezruchko* // *Chaos.* 2009. V. 19, P. 033112.
17. *T. Dikanev, D. Smirnov, R. Wennberg, J.L. Pe-rez Velazquez, B. Bezruchko* // *Clinical Neurophysiology.* 2005. V. 116. N. 8. P. 1796-1807.
18. *H.B. Mann, D.R. Whitney* // *Annals of Mathematical Statistics.* 1947. V. 18. N. 1. P. 50-60.
19. *L.E.V. Silva, C.A.A. Silva et al.* // *Applied Physiology.* 2017. V. 123. N. 2. P. 344-351.

## ДВУХСЛОЙНЫЕ АНТИОТРАЖАЮЩИЕ НАНОПОКРЫТИЯ ДЛЯ СТЕКЛЯННЫХ ПЛАСТИН НА ОСНОВЕ ОКСИДОВ КРЕМНИЯ И ЦИНКА

М.Ю. Васильков<sup>1,2</sup>, С.С. Волчков<sup>1,3</sup>, Н.М. Ушаков<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>Саратовский филиал ИРЭ им. В.А. Котельникова РАН

<sup>2</sup>Саратовский национальный исследовательский государственный университет им. Н.Г. Чернышевского

<sup>3</sup>Саратовский государственный технический университет им. Гагарина Ю.А.  
E-mail: vasilk.mikhail@yandex.ru, nmu@bk.ru

Одним из основных конструктивных элементов фотоэлектрических устройств являются стеклянные покрытия для защиты солнечных элементов от воздействия окружающей среды, особенно для работы на открытом воздухе. Антиотражающая способность данных стеклянных покрытий имеет важное значение для повышения эффективности оптического пропускания (просветления) и адекватной механической стабильности. Высокая эффективность многослойных просветляющих покрытий может достигаться за счет уменьшения показателя преломления верхнего слоя и формирования тонко структурированной пористой пленки. Известны работы, в которых тонкие пленки пористого SiO<sub>2</sub> со сверхнизкими показателями преломления и двухслойные антиотражающие покрытия с широкополосными, высокопропускающими и устойчивыми к царапинам свойствами были получены простым золь-гель методом [1,2]. Нижний слой представлял собой смесь наночастиц кремния и линейных силикатных полимеров («SiO<sub>2</sub> NPs-LP»), полученных из двухстадийного катализируемого основанием/кислотой тетраэтилортосиликата («TEOS»), тогда как верхний слой представлял собой смесь полых наночастиц кремния и линейных силикатных полимеров («HSiO<sub>2</sub> NPs-LP») [2]. В работе [3] сравниваются различные типы трехслойных мезопористых кремниевых покрытий с градуированной пористостью, изготовленных методом самосборки, вызванной испарением.

В данной работе объектами изучения являлись композитные двухслойные двухсторонние нанопокрывтия на основе оксида кремния SiO<sub>2</sub>, модифицированного оксидом цинка ZnO, нанесенные на поверхность предметных стекол (75x25x1,1 мм, ApexLab, РФ) методом вытягивания из раствора (рис. 1, а). Первоначально на стекла наносился слой SiO<sub>2</sub> с варьируемой толщиной <math>d1</math> (при скорости вытягивания 110-168 мм/мин) из сформированного золя диоксида кремния, приготовленного последовательным смешением дистиллированной воды, этилового спирта, уксусной кислоты и тетраэтоксисилана в мольном соотношении 12,2:30:2:1. После нанесения покрытия на основе SiO<sub>2</sub> осуществлялась термообработка подложки в воздушной атмосфере при 500±5°C в течение 30 мин, затем наносился второй слой покрытия SiO<sub>2</sub>+ZnO толщиной <math>d2</math> из золя с составом, аналогичным вышеуказанному, с добавкой ацетата цинка Zn(CH<sub>3</sub>COO)<sub>2</sub>\*2H<sub>2</sub>O в количестве 0,076 моль.% с заключительным отжигом в течение 60 мин. Условия приготовления полимерных зольей и нанесения композиционных покрытий подробно описаны в работе [4].

Оптические спектральные измерения пропускания стеклянных пластин с нанесёнными покрытиями проводились по описанной ниже схеме. Световой пучок от лампы Ocean Optics DH — 2000 — BAL через световод (оптоволокну Ocean Optics P-100-2-UV-VIS) и коллиматор падает под заданным углом на образец. Образец располагался на площадке гониометра Standa 068979. Отраженный пучок света через коллиматор OceanOptics 74 DA и оптоволокну попадал на вход спектрометра OceanOptics QE 65000.

На рисунке 1,б приведены измеренные спектральные зависимости разности оптического пропускания однослойного покрытия  $\text{SiO}_2$  и двухслойного покрытия  $\text{SiO}_2$  &  $\text{SiO}_2@ZnO$  на стеклянной подложке. Таким образом, нанесение дополнительного композитного слоя  $\text{SiO}_2@ZnO$  увеличивает широкополосное просветление стеклянной пластины на  $\sim 1,5\%$  в оптическом диапазоне длин волн 400-1000 нм.

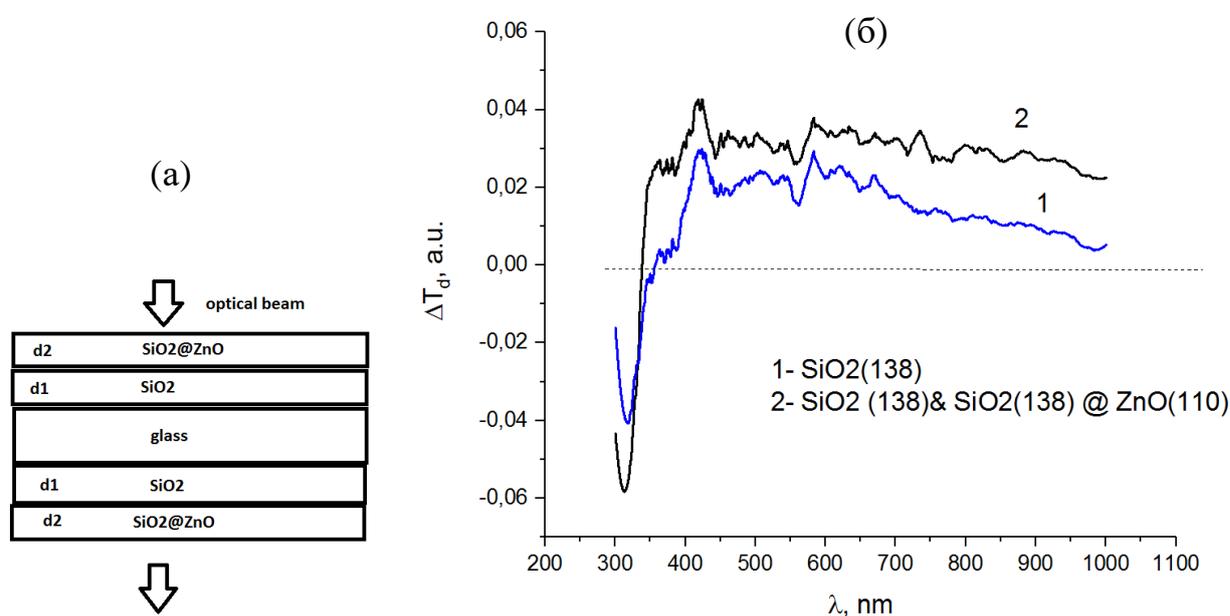


Рис.1. Схематическое изображение двухслойной двусторонней структуры нанопокровтий на стеклянной подложке (а).

Спектральные зависимости разности оптического пропускания однослойного покрытия  $\text{SiO}_2$  (кривая 1) и двухслойного покрытия  $\text{SiO}_2$  &  $\text{SiO}_2@ZnO$  (кривая 2) на стеклянной подложке. За нулевой уровень приняты спектральные значения пропускания чистой стеклянной пластины (б)

*Работа выполнена в рамках государственного задания «Сенсор-2».*

#### Библиографический список

1. Suzuki R. // Journal of Sol-Gel Science and Technology. 2023. Vol.106. P.860.
2. Bao L., Wu J., Wang H., Chen R // Materials Letters. 2016. Vol.185. P. 464.
3. Fateme Hassan-Aghaei, Mohammad Masoud Mohebi // Optical Materials. 2023. Vol.135. P.113246.
4. Isaev A.E., Kosobudsky I.D., Ushakov N.M., Mikhailov I.N., Vasilkov M.Yu. // RENSIT: Radioelectronics. Nanosystems. Information Technologies. 2023. Vol.15(1). P. 51.

## ПРИМЕНЕНИЕ ИСКУССТВЕННОЙ НЕЙРОННОЙ СЕТИ ДЛЯ ДИАГНОСТИКИ НАПРАВЛЕННОЙ СВЯЗИ МЕЖДУ ОСЦИЛЛЯТОРАМИ ВАН ДЕР ПОЛЯ В ПРИСУТСТВИИ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ ШУМОВ

А.М. Вахлаева<sup>1</sup>, Ю.М. Ишбулатов<sup>2</sup>, А.С. Караваяев<sup>2</sup>, В.И. Пономаренко<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Саратовский национальный исследовательский государственный университет  
им. Н.Г. Чернышевского

<sup>2</sup>Саратовский филиал Института радиотехники и электроники  
им. В.А. Котельникова РАН  
E-mail: vakhlaeva.anna@gmail.com

Диагностика направленных связей - метод нелинейной динамики, применяющийся для фундаментального изучения вегетативной регуляции человека [1] и решения прикладных задач медицинской диагностики, например, выявления очагов эпилепсии. Однако широкополосная, нестационарная природа биосигналов и нелинейный характер их взаимодействия предъявляет особые требования к методам диагностики направленных связей [2], в частности применимость к коротким временным рядам и устойчивость к измерительным шумам и шумам в динамике системы. Поэтому разработка новых методов диагностики направленных связей, в частности методов, не требующих введения фаз широкополосных сигналов, остаётся актуальной задачей. Перспективным направлением представляется адаптация к данной задаче искусственных нейронных сетей.

Для тестирования эффективности искусственной нейронной сети при работе с короткими, до 6 периодов, зашумленными временными рядами была выбрана система двух однонаправленно связанных осциллятора ван дер Поля (1):

$$\begin{cases} \frac{d^2x}{dt^2} - (\mu_1(1-x)^2) \frac{dx}{dt} + (1-0.5\Delta)x = 0 \\ \frac{d^2y}{dt^2} - (\mu_2(1-y)^2) \frac{dy}{dt} + (1+0.5\Delta)y + e(y-x) = 0 \end{cases}, \quad (1)$$

где  $\mu=2$  — коэффициент нелинейности,  $\Delta$  — относительная частотная расстройка осцилляторов, при создании обучающей базы данных данный параметр изменялся от -1 до 1.5 с шагом 0.001,  $e$  — коэффициент инерционной связи, изменялся от 0 до 0.5 с шагом 0.001. Рассматривались параметры системы, при которых режима синхронизации между осцилляторами не наблюдалось. Для решения уравнения применялся метод Эйлера с шагом интегрирования 1/250, затем сигнал перевыбирался с частотой дискретизации 10 Гц. Периоды сигналов при указанных параметрах изменялись от 5 до 12 с. При исследовании влияния измерительного шума на работу искусственной нейронной сети использовался белый шум. Уровень измерительного шума оценивался относительно дисперсии сигнала.

Была выбрана искусственная нейронная сеть сверточного типа, которая продемонстрировала более высокую точность, чем полносвязная нейронная сеть.

Также сверточные нейронные сети широко применяются при анализе временных рядов [3].

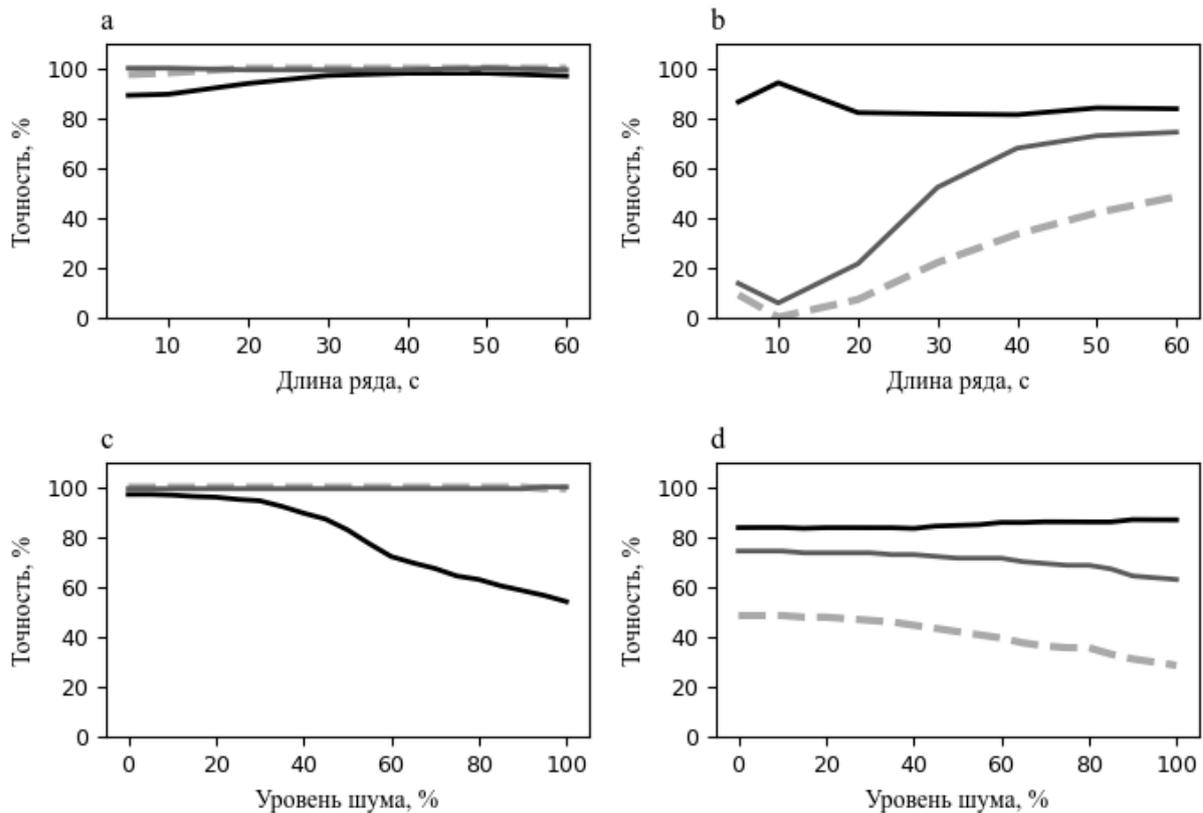


Рис. 1 Зависимость точности диагностики однонаправленной связи с помощью искусственной нейронной сети (а) и корреляционного анализа (б) от длины временного ряда. Зависимость точности диагностики однонаправленной связи с помощью искусственной нейронной сети (с) и корреляционного анализа (д) от уровня измерительного шума. Черные сплошные линии соответствует коэффициенту силы связи в диапазоне 0–0.15, серые сплошные — 0.15–0.3, серая пунктирная линия — 0.3–0.5.

Искусственная нейронная сеть демонстрирует большую точность диагностики однонаправленной связи по коротким временным рядам, чем корреляционный анализ, в каждом рассмотренном диапазоне коэффициента силы связи (рис.1, а-б). Также искусственная нейронная сеть демонстрирует большую устойчивость к измерительным шумам, чем корреляционный анализ (рис.1, с-д).

*Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда, грант № 23-12-00241.*

#### Библиографический список

1. Karavaev, A.S, Prokhorov, M.D, Ponomarenko, V.I, Kiselev, A.R, Gridnev, V.I, Ruban, E.I, Bezruchko, B.P. // *Chaos*. 2009. Vol 19(3):033112. DOI: 10.1063/1.3187794.
2. Караваяев А.С., Пономаренко В.И., Прохоров М.Д. // *Письма в Журнал технической физики*. 2001. Т. 27. № 10. С. 43-51.
3. E. Martinez-Ríos et al. (2021) // *Biomedical Signal Processing and Control* 68 (2021) 102813. doi:10.1016/j.bspc.2021.102813

## ИЗУЧЕНИЕ ВЛИЯНИЯ ПАРАМЕТРОВ МИНЕРАЛИЗАЦИИ НА МОРФОЛОГИЮ ПОВЕРХНОСТИ КОМПОЗИТНОГО МАТЕРИАЛА

**И.С. Великанов, Н.В. Короневский, И.В. Хайрушев, В.И. Гукова,  
Б.В. Сергеева**

*Саратовский национальный исследовательский государственный университет*

*им. Н.Г. Чернышевского*

*E-mail: [ainselloigo@gmail.com](mailto:ainselloigo@gmail.com)*

Одно из направлений развития регенеративной медицины [1,2] – разработка биосовместимых, биоразлагаемых биомедицинских материалов [3,4] на основе функционализированных полимерных матриц. Такой композитный материал может быть получен на основе волокон поликапролактона (ПКЛ) с минерализованными на его поверхности частицами карбоната кальция ( $\text{CaCO}_3$ ) модификации ватерит [5–7], которые благодаря высокой пористости обладают способностью к загрузке лекарственных средств в поры [8].

Разработаны две методики выращивания на волокнах ПКЛ микрочастиц  $\text{CaCO}_3$  с включёнными (и без) в их состав наночастицами магнетита [9–11], а также проведён расчет и анализ размеров полученных на образцах образований. Исследовано влияния концентраций водных растворов карбоната натрия ( $\text{Na}_2\text{CO}_3$ ) и хлорида кальция ( $\text{CaCl}_2$ ), а также времени стабилизации микрочастиц  $\text{CaCO}_3$  на размеры полученных образований. Проведены экспериментальные исследования свойств образцов волокон в СВЧ диапазоне и в постоянном магнитном поле [12–14].

В данной работе исследовано влияние концентраций исходных водных растворов хлорида кальция и карбоната натрия, а также времени ультразвуковой обработки на процесс минерализации волокон ПКЛ микрочастицами ватерита сканирующей электронной микроскопией.

Минерализацию волокон ПКЛ микрочастицами  $\text{CaCO}_3$  проводили по алгоритму работы [15]. Образец волокон помещали в пробирку с 1 мл раствора  $\text{CaCl}_2$ , обрабатывали в ультразвуковой ванне в течение 1 минуты, затем при УЗ обработке вводили 1 мл раствора  $\text{Na}_2\text{CO}_3$ , подвергали воздействию ультразвука еще 1 мин, после чего изымали из ванны для завершения процесса кристаллизации. Обработанный материал промывали этиловым спиртом и в течение 20 мин помещали в сушильный шкаф при  $40^\circ\text{C}$ . Процесс минерализации проводили три раза. Концентрации рабочих растворов изменяли от 0,25 до 1 моля, а время УЗ обработки – от 30 до 90 секунд.

Морфологию поверхности полученных образцов исследовали с помощью сканирующей электронной микроскопии на базе растрового электронного микроскопа высокого разрешения Mira II LMU фирмы «TESCAN» в режиме вторичных электронов. Для проведения исследований на образцы напыляли золотое покрытие. Полученные СЭМ изображения были обработаны с помощью программного обеспечения Image J. Для определения среднего размера сформированных микрочастиц карбоната кальция в каждом технологическом цикле (ТЦ) анализу подвергали 500 микрочастиц. Результаты проведённого анализа представлены в таблице.

Таблица. Средний диаметр микрочастиц ватерита, синтезированных на волокнах ПКЛ

Ultrasonic treatment time (sec) / Concentration of salt solutions (M)	30 sec	60 sec	90 sec
0,25 M	1,2 ± 0,4 μm	1,2 ± 0,4 μm	0,7 ± 0,2 μm
0,5 M	0,8 ± 0,5 μm	1,1 ± 0,3 μm	1,3 ± 0,3 μm
0,75 M	0,8 ± 0,4 μm	1,1 ± 0,6 μm	0,5 ± 0,1 μm
1 M	0,7 ± 0,3 μm	0,8 ± 0,4 μm	0,7 ± 0,2 μm

Показано, что образцы, полученные из водных растворов хлорида кальция и карбоната натрия с концентрацией 0,5 М и временем УЗ обработки 60 и 90 секунд, обладают бóльшей однородностью, чем при других параметрах синтеза. Планируется проведение рентгеноструктурного анализа фазового состава синтезированного материала, поскольку высокая массовая доля кальцита значительно уменьшает время эффективного использования материала для капсуляции и контролируемого высвобождения лекарственных средств, а также снижает эффективность загрузки капсулируемого вещества.

#### Библиографический список

1. Edgar L., Pu T., Porter B. et al. // Journal of British Surgery. 2020. V. 107(7). P. 793–800.
2. Thadepalli S. // Materials Today: Proceedings. 2022. V. 55. P. 330–336.
3. Dvir T., Timko B.P., Kohane D.S., Langer R. // Nat. Nanotechnol. 2011. V. 6. Pp. 13–22.
4. Grayson W., Martens T. et al. // Seminars in cell & devel. biology. 2009. V. 20(6). P. 665–673.
5. Koronevskiy N.V., Savelyeva M.S., Lomova M.V. et al. // Izvestiya of Saratov University. Physics. 2022. V. 22(1). P. 62–71.
6. Koronevskiy N.V., Inozemtseva O.A., Sergeeva B.V. et al. // Izvestiya of Saratov University. Physics. 2023. V. 23(2). P. 179–187.
7. Короневский Н.В., Сергеев С.А., Ломова М.В., Савельева М.С. Патент 2761321 РФ. Способ минерализации органических волокон поликапролактона микрочастицами карбоната кальция. № 2021101913; заявл. 28.01.2021; опубл. 07.12.2021. Бюл. № 34.
8. Vikulina A., Voronin D., Fakhrullin R. et al. // New Journal of Chemistry. 2020. V. 44. P. 5638.
9. Сергеев С.А., Михайлов А.И., Горин Д.А. и др. // Полупроводниковая электроника и молекулярные нанотехнологии: Сб. статей. – Саратов: Наука, 2013. С. 214–228.
10. Сергеев С.А., Гулманов Э.Э., Сергеев Р.С. // В мире научных открытий. 2014. № 4(52). С. 148–160.
11. Короневский Н.В., Хайрушев И.В., Сергеева Б.В. и др. // Электроника и микроэлектроника СВЧ. 2023. Т. 1. С. 642–646.
12. Короневский Н.В., Сергеев Р.С., Савельева М.С., Сергеев С.А. // Методы компьютерной диагностики в биологии и медицине - 2017: Материалы Всерос. школы-семинара. Саратов: Саратовский источник, 2017. С. 120–123.
13. Сергеев С.А., Короневский Н.В., Аткин В.С. и др. // Наноэлектроника, нанофотоника и нелинейная физика: тез. докл. Саратов: Техно-Декор, 2017. С. 249–251.
14. Сергеев С.А., Короневский Н.В., Гулманов Э.Э., Сергеев Р.С. // Электроника и микроэлектроника СВЧ. 2017. Т. 1. С. 155–159.
15. Savelyeva M.S., Abalymov A.A., Lyubun G.P. et al. // Journal of Biomedical Materials Research Part A. 2017. V. 105(1). P. 94–103.

## НЕЛИНЕЙНО-ОПТИЧЕСКИЕ И СЕНСОРНЫЕ СВОЙСТВА ВСПЕНЕННЫХ ФЛУОРЕСЦИРУЮЩИХ ПОЛИМЕРНЫХ МАТРИЦ. ПЕРСПЕКТИВЫ И ПРОБЛЕМЫ ПРИКЛАДНЫХ ПРИМЕНЕНИЙ

С.С. Волчков<sup>1,2</sup>, Е.В. Ушакова<sup>1</sup>, Н.М. Ушаков<sup>2</sup>, Д.А. Зимняков<sup>1</sup>

<sup>1</sup>СГТУ имени Гагарина Ю.А.

<sup>2</sup>Саратовский филиал ИРЭ им. В.А. Котельникова РАН

E-mail: [volchkov93@bk.ru](mailto:volchkov93@bk.ru)

Исследования в области сверхкритического флюидного синтеза высокопористых функциональных материалов для различных применений активно проводятся на протяжении последних тридцати лет [1-4]. К настоящему времени достигнуты весьма существенные успехи в разработке процессов и технологий вспенивания, пластифицированных биорезорбируемых полимерных материалов, предварительно насыщенных сверхкритическими флюидными (СКФ) агентами (в основном двуокисью углерода). В то же время в области СКФ синтеза высокопористых функциональных материалов сложилась несколько парадоксальная ситуация, обусловленная существенным отставанием уровня диагностики в реальном масштабе времени неравновесных физических процессов в синтезируемых средах на микро и макроскопическом уровне, а также уровня теоретического описания этих процессов от современных достижений в области разработки и практического применения подобных технологий. Одним из путей решения подобной проблемы может быть внедрение во вспененные случайно-неоднородные полимерные матрицы оптически активных флуоресцирующих добавок на основе комплексов «лазерный краситель – наночастицы» с целью расширения диагностических возможностей за счет современных достижений нанофотоники и методов флуоресцентной спектроскопии.

В данной работе рассматривается эволюция высокопористых полимерных матриц, насыщенных флуоресцирующими агентами (родамин 6Ж + наночастицы анатаза  $TiO_2$ ) в процессе СКФ синтеза с применением разработанных экспериментальных методов оптической диагностики. Исследуются нелинейно-оптические и сенсорные свойства готовых пен с различной степенью формирования каналов Плато-Гиббса на основе эффектов стохастической лазерной генерации и квазиволноводного режима распространения флуоресцентного излучения.

Рассматриваются технологии получения флуоресцирующих полимерных матриц (рис. 1) с ростом в открытых и закрытых объемах при начальных условиях давления и температуры порядка 8-9 МПа и 320 К с нелинейным характером сброса давления с постепенным замедлением скорости сброса с 0.02 МПа/с до 0.0015 МПа/с.

Эволюция матрицы в процессе СКФ вспенивания качественно и количественно оценивалась путем регистрации флуоресцентного сигнала с ее объема при зондировании лазерным источником излучения в полосе поглощения используемого флуорофора с помощью внедренного в реактор высокого давления оптического блока, основанного на оптоволоконном патч-корде и спектрометре. Установлена высокая взаимосвязь между ростом объема пены и ростом интенсивности флуоресценции, что является косвенным доказательством упомянутого

выше квазиволноводного режима распространения излучения в подобных средах.

Нелинейно-оптические и сенсорные свойства были исследованы в рамках возбуждения эффекта стохастической лазерной генерации, проявляющегося в сужении спектра флуоресценции при увеличении интенсивности накачки. Установлены предельные значения спектрального качества регистрируемого флуоресцентного сигнала для пен с развитой сетью каналов Плато-Гиббса и с их отсутствием. Рассматривается конкуренция между средней длиной распространения флуоресцентного излучения в накачиваемой среде и характерным масштабом распространения парциальных составляющих флуоресцентного поля между последовательными актами индуцированного излучения (длиной стимулированной эмиссии).

В работе обсуждаются перспективы применений в нанофотонике и биомедицине и проблемы, связанные с регистрацией излучения внутри биообъекта и деградации красителя на длительных временных масштабах.

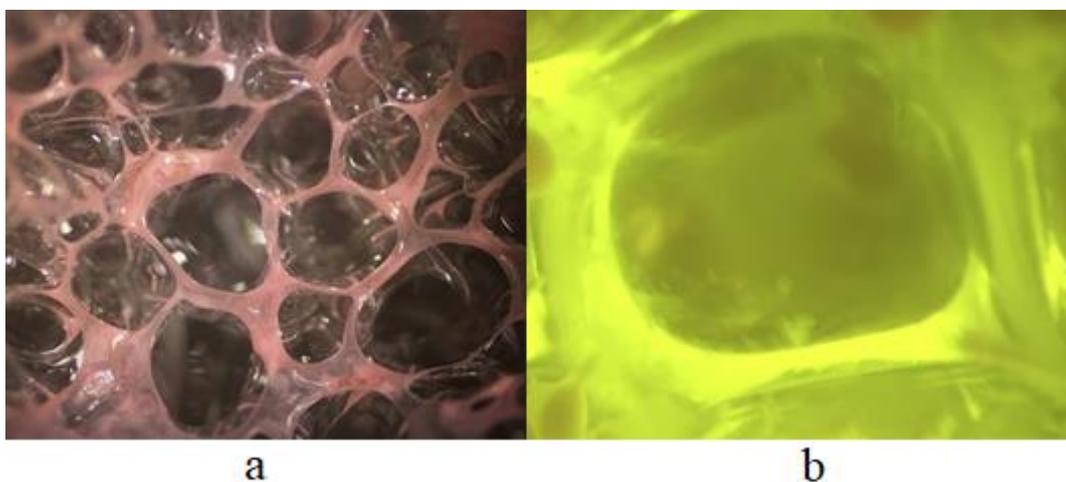


Рис. 1. (а) Фотография структуры полимерной флуоресцирующей пены, (б) Макрофотография флуоресценции каналов в полимерной пене.

*Работа выполнена в рамках государственного задания «Сенсор-2».*

#### Библиографический список

1. *Bogorodskii S.E., Krotova L.I., Mironov A.V., et. al., // Russ. J. Physical Chemistry B. 2013. V. 7. Pp. 916–923.*
2. *Golubeva, E. N., et al. // The Journal of Supercritical Fluids. 2020. V. 158. P. 104748.*
3. *Trifanova E. M., et al. // Molecules. 2022. V. 27. P. 6547.*
4. *Barry J.J.A., Gidda H.S., Scotchford C.A., et. al. // Biomaterials. 2004. V. 25. Pp. 3559-3568.*

# СВЯЗАННЫЕ СПИНОВЫЕ ВОЛНЫ В НЕРЕГУЛЯРНЫХ МАГНОННЫХ СТРУКТУРАХ НА ОСНОВЕ ЛАТЕРАЛЬНЫХ ЖИГ МИКРОВОЛНОВОДОВ ТРАПЕЦИЕВИДНОЙ ФОРМЫ

Ф.Е. Гаранин, В.А. Губанов, А.В. Садовников

Саратовский национальный исследовательский государственный университет  
им. Н.Г. Чернышевского

E-mail: [garaninfedorwork@mail.ru](mailto:garaninfedorwork@mail.ru)

В настоящее время развитие магноники [1-2], направленное на изучение процессов переноса магнитного момента или спина электрона вместо заряда, открывает новые возможности использования спиновых волн (СВ) для создания элементной базы устройств обработки, передачи и хранения информации. В качестве таких устройств можно создавать нерегулярные структуры, например, волноводы с переменной шириной. В качестве магнитного материала для формирования магнитных волноводов применяются пленки железо-иттриевого граната (ЖИГ) [3-4], которые демонстрируют рекордно низкие значения затухания спиновых волн, даже при нанометровых толщинах.

В данной работе рассматривается система из двух латерально расположенных трапециевидных микроволноводов с зазором  $d$  между ними (см. рис. 1). Исследуемая структура выполнена из ЖИГ толщиной 10 мкм, длиной  $L = 7$  мм. Ширина  $w_1 = 500$  мкм,  $w_2 = 250$  мкм, ширина зазора  $d$  варьируется от 20 до 80 мкм.

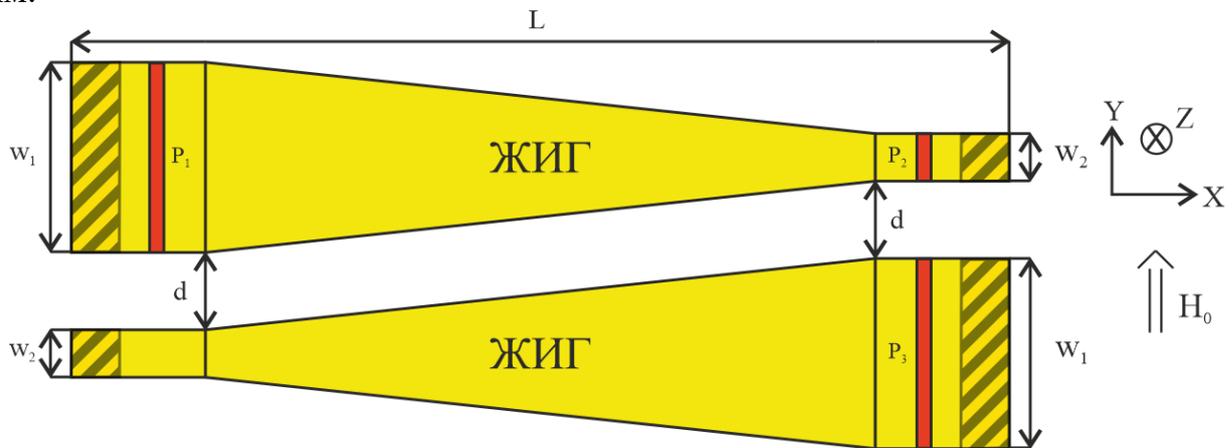


Рис. 1. Схематическое изображение системы латерально связанных микроволноводов.

Микромагнитное моделирование проводилось в пакете MuMax3 [5], где структура разбивалась на сетку, в узлах которой численно решалось уравнение Ландау-Лифшица с затуханием Гильберта [6-7]. В микромагнитном моделировании создавались условия для возбуждения поверхностной магнитоэлектрической волны (ПМСВ), при котором внешнее магнитное поле  $H_0$  прилагалось вдоль  $Oy$ . Величина параметра внешнего магнитного поля  $H_0$  составляла 1200 Э.

Рассматриваемая система имеет три порта:  $P_1$  — входной, на котором возбуждался СВЧ сигнал, и  $P_2$  и  $P_3$  — приемники спиновых волн. Для минимизации отражений от границ расчетной области были введены поглощающие слои с экспоненциально возрастающим коэффициентом затухания  $\alpha$  [8-9], отмеченные заштрихованной областью на рисунке 1.

Таким образом, численное моделирование показало, что с увеличением зазора между волноводами эффективность переноса спиновых волн уменьшается. Данная структура может быть использована как направленный ответвитель СВЧ сигнала для создания устройств обработки информационных сигналов на принципах магноники.

*Работа выполнена при поддержке Минобрнауки России в рамках выполнения государственного задания (проект № FSRР-2023-0008).*

#### Библиографический список

1. Gurevich A.G. — “Magnetic Resonance in Ferrites and Antiferromagnets”. Nauka Publ., 1973. P. 220.
2. Chumak A.V. et al. // IEEE Trans. Magn. 2022. V. 58. Is. 6.
3. Cherepanov V., Kolokolov I., L'vov V. // Phys. Rep. 1993. V. 229. Is. 3. P. 81.
4. Hauser C. et al. // Sci. Rep. 2016. V. 6. P. 20827.
5. Vansteenkiste A. et al. // AIP Adv. 2014. V. 4. P. 107133.
6. Landau L., Lifshitz E. // Phys. Z. Sowj. 1935. V. 8. P. 153.
7. Gilbert T.L., Kelly J.M. // AIEE Trans. 1955. P. 253.
8. Venkat G., Fangohr H., Prabhakar A. // J. Magn. Magn. Mater. 2018. V. 450. P. 34.
9. Dvornik M., Kuchko A.N., Kruglyak V.V. // J. Appl. Phys. 2011. V. 109. P. 07D350.

## СИСТЕМА ДЕМУЛЬТИПЛЕКСОРА НА ОСНОВЕ СПИНОВЫХ ВОЛН ПРИ ИХ РАСПРОСТРАНЕНИИ В ЛАТЕРАЛЬНОЙ СТРУКТУРЕ ЧЕТЫРЁХ КОЛЬЦЕВЫХ РЕЗОНАТОРОВ

С. А. Гетманов<sup>1</sup>, А. В. Садовников<sup>1</sup>

<sup>1</sup>*Саратовский национальный исследовательский государственный университет имени Н.Г. Чернышевского*

*E-mail: [svyatoslav.getmanov@yandex.ru](mailto:svyatoslav.getmanov@yandex.ru)*

Развитие магноники, представляющей собой область исследования в физике магнетизма и конденсированного состояния, постоянно сопровождается поиском применения спиновых волн (СВ) для реализации систем обработки информационных сигналов. Последние представляют из себя комплексные модули, позволяющие осуществлять генерацию, передачу и обработку сигналов в рамках использования одной среды – структуры на основе ферро- и ферритмагнитных тонких пленок. На пути реализации такого подхода, называемого «магنونной логикой» оказывается важным и создание интерфейсов разного уровня внутри магнонных сетей, при этом исследования, направленные на разработку методов и подходов к записи сигнала на настоящий момент, только начинают появляться [1,2]. При этом одним из преимуществ использования СВ для передачи данных и проведения вычислений является возможность преобразования сигнала как с помощью амплитуды, так и с помощью фазы СВ. Такой подход даёт перспективу к созданию сложной и многоступенчатой системы конвертации информации с преобразования электрических сигналов в магнонные и обратно. Необходимость в этом обнаруживается при рассмотрении СВ, как носителей информации, позволяющих увеличить тактовые частоты устройств обработки информации, а также её повысить энергоэффективность устройств за счет отсутствия дрейфовых токов при использовании диэлектрических ферромагнетиков [3].

Данная работа посвящена использованию латеральных структур на основе четырёх резонаторов, как демультиплексора 1 в 4. Такой метод позволит включить исследуемые структуры в область «магنونной логики». Основой для такой методики послужат, рассмотренные в выше указанной работе, способности к ответвлению и развороту поверхностной магнитостатической волны в используемой структуре. Управляя частотой подаваемого сигнала и геометрическими параметрами системы можно корректировать, как амплитуду СВ, так и направление распространения сигнала [1].

Используемая в данной работе структура представляет собой две полоски шириной в 500 мкм, расположенных параллельно друг другу, между которыми размещены четыре кольцевых резонатора. Все элементы выполнены на основе пленки железо-иттриевого граната (ЖИГ) на подложке из галлий – гадоллиниевого граната. Толщина слоя ЖИГ составляет 10 мкм, а зазор между микроволновыми волнами составляет 50 мкм, при этом величина зазора выбрана из условия реализации режима многомодовой связи магнитостатических волн. Расстояние между двумя резонаторами  $d$  может варьироваться для обеспечения наибольшего числа шаблонов записи информации. По тому же принципу выбираются длины плеч резонаторов –  $R_1$  и  $R_2$  вдоль направления осей  $x$  и  $y$ , соответственно. По всему

пространству структуры формируется однородное статическое магнитное поле  $H$ , направленное вдоль оси  $x$  для эффективного возбуждения поверхностных магнитостатических волн. На концах каждой полоски устанавливаются антенны  $P_1 - P_4$ . Антенны – выходы  $P_2, P_3, P_4$  расположены, соответствуя своему порядку, на правом конце первого волновода и, соответственно, на концах второго. Они предназначены для снятия выходного сигнала проходящей волны. Антенна  $P_1$  используется для возбуждения спиновой волны в структуре и расположена на левом конце первого волновода. [1]

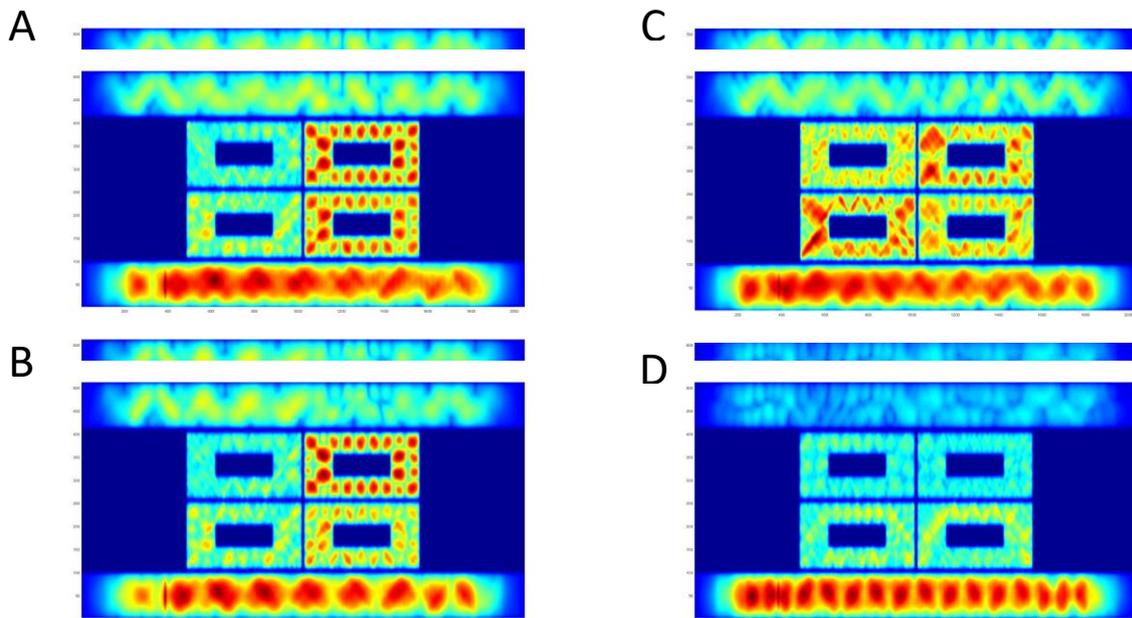


Рис 1 Пространственное распределение интенсивности спиновых волн распространяющихся в структуре четырех кольцевых резонаторов.

Проведено микромагнитное моделирование спиновых волн, продемонстрирована фазовое согласование между двумя соседними магнитными волноводами, которое достигается благодаря динамическим дипольным полям как в плоскости, так и вне плоскости, несмотря на, влияние кольцевых резонаторов.

*Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ 20-79-10191.*

#### Библиографический список

1. Одинцов С.А., Губанов В.А., Садовников А.В Динамика распространения спиновых волн в латеральной структуре с кольцевым резонатором // Сборник статей MetaNanoBio. 2019. С. 146
2. Yi Li, Wei Zhang, Vasyl Tyberkevych, Wai-Kwong Kwok, Axel Hoffmann, Valentine Novosad Hybrid magnonics: Physics, circuits, and applications for coherent information processing featured // J. Appl. Phys. 2020. Vol. 128. P.130902.
3. Д.В. Калябин С.А. Никитов Современное состояние исследований в спинтронике и магнетике // Всероссийские открытые Армандовские чтения: молод. школа. 2023. С. 47

## ПОГЛОЩЕНИЕ СВЕТОВОЙ ВОЛНЫ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ПЛЕНКОЙ С МОНОСЛОЕМ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ НАНОЧАСТИЦ

И.А. Глухов<sup>1,2</sup>, С.Г. Моисеев<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>Ульяновский государственный университет

<sup>2</sup>Ульяновский филиал ИРЭ им. В. А. Котельникова РАН

E-mail: [glukhov91@yandex.ru](mailto:glukhov91@yandex.ru)

Известно несколько подходов к решению проблемы подавления отражения электромагнитных волн от поверхности материальной среды. Помимо различных интерференционных покрытий и покрытий с диффузионным отражением в последнее десятилетие предложены поглощающие покрытия с использованием двумерных структур [1-3]. В данной работе показана возможность практически полного подавления отражения (в узком спектральном диапазоне частот) световой волны от отражающих поверхностей (металл, фотонный кристалл в области фотонной запрещенной зоны) за счет применения поглощающего композитного покрытия – диэлектрической пленки с двумерным массивом металлических наночастиц (НЧ) (рис. 1).

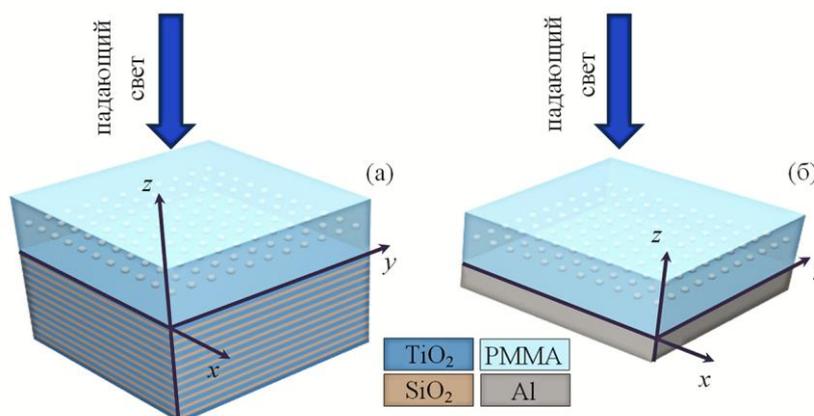


Рис. 1. Нанокompозитное покрытие с двумерным массивом НЧ на поверхности металлической пленки (а) и на поверхности фотонного кристалла (б). Наночастицы выполнены из серебра, пленка покрытия – из ПММА (PMMA).

Показано, что монослой серебряных НЧ диаметром 20 нм и межчастичным расстоянием в несколько десятков нм, размещенный в диэлектрической пленке на поверхности металла (рис. 2(а) и рис. 2(б)) или фотонного кристалла (рис. 2(в) и рис. 2(г)), может приводить к практически полному поглощению падающего излучения в области плазмонного резонанса НЧ. При этом вне спектральной области плазмонного резонанса массив НЧ практически не влияет на спектральные характеристики структуры. Длина волны, на которую приходится максимум поглощения, определяется материалом пленки, а также материалом и формой наночастиц [4,5]. Применение НЧ несферической формы позволяет контролировать рабочую частоту поглотителя, а также реализовать поглотитель с отличающимися рабочими частотами для разной поляризации падающего излучения. Эффект резонансного поглощения может так же быть реализован для частот в интервале от видимой области до терагерцевого диапазона спектра.

Полученные результаты могут быть использованы для разработки фильтров, поляризаторов, фотодетекторов и других устройств интегральной фотоники и оптоэлектроники.

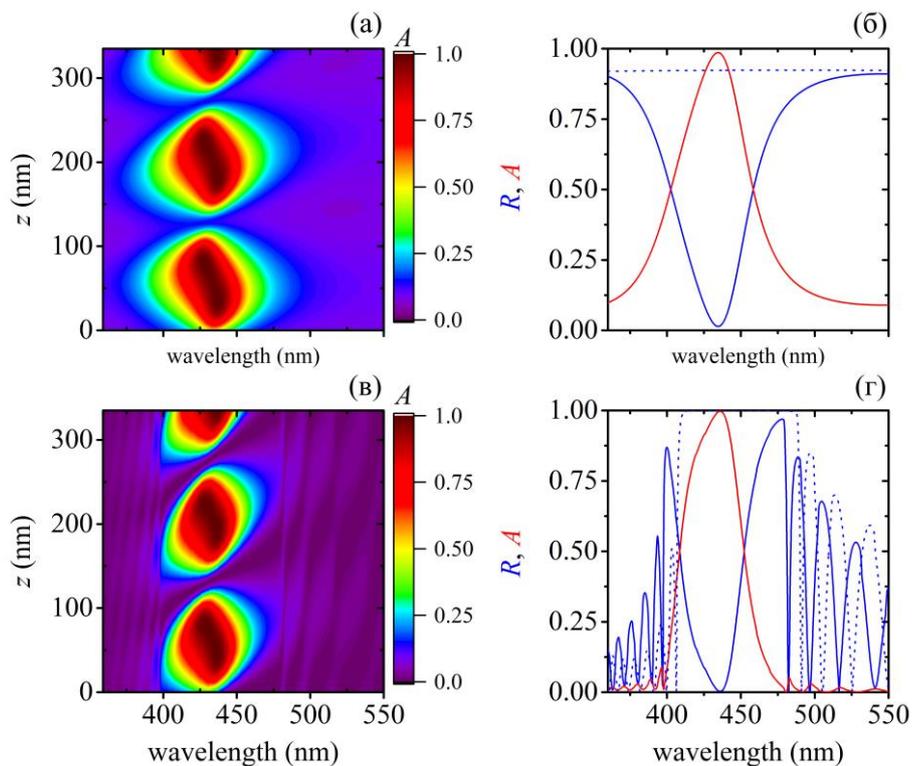


Рис. 2. Спектры поглощения и отражения (сплошные линии) структур «массив наночастиц / диэлектрическая пленка / металлическая подложка» (а), (б) и «массив наночастиц / диэлектрическая пленка / фотонный кристалл» (в), (г). Пунктирными линиями показана отражательная способность металлической подложки (б) и фотонного кристалла (г) без композитного покрытия. На панелях (а) и (в) представлены зависимости от местоположения наночастиц (расстояния  $z$  до поверхности металла или фотонного кристалла). Графики (б) и (г) получены для  $z = 200$  нм. Диаметр НЧ 20 нм, межчастичное расстояние 70 нм.

*Работа выполнена при поддержке Министерства науки и высшего образования РФ (государственное задание ИРЭ им. В.А. Котельникова РАН, государственное задание УлГУ № FEUF-2023-0003).*

### Библиографический список

1. Escoubas L., Carlberg M., Le Rouzo J., Pourcin F., Ackermann J., Margeat O., Reynaud C., Duche D., Simon J.-J., Sauvage R.-M., Berginc G. // Progress in Quantum Electronics. 2019. V. 63. p. 1-22.
2. Zamzam P., Rezaei P., Abdulkarim Y.I., Daraei O.M. // Optics & Laser Technology. 2023. V. 163. p. 109444.
3. Liu J.-T., Liu N.-H., Li J., Li X. J., Huang J.-H. // Appl. Phys. Lett. 2012. V. 101, N. 5. p. 052104.
4. Moiseev S.G., Glukhov I.A. // J. Appl. Phys. 2024. V. 135. p. 083106.
5. Moiseev S.G., Glukhov I.A., Dadoenkova Y.S., Bentivegna F.F.L. // J. Opt. Soc. Am. B. 2019. V. 36. p. 1645-1652.

## НОВАЯ МЕТОДИКА ДЕТЕКТИРОВАНИЯ СЕРДЕЧНОГО РИТМА В СИЛЬНО ЗАШУМЛЕННЫХ СИГНАЛАХ ЭКГ И ФПГ

М.О. Журавлёв<sup>1,2</sup>, А.Е. Руннова<sup>1</sup>, А.Р. Киселев<sup>1</sup>, О.М. Драпкина<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Национальный медицинский исследовательский центр терапии и профилактической медицины Министерства здравоохранения

<sup>2</sup>Саратовский национальный исследовательский государственный университет имени Н.Г. Чернышевского

E-mail: [zhuravlevmo@gmail.com](mailto:zhuravlevmo@gmail.com)

В последние десятилетия во всех странах мира наблюдается рост числа смертей, вызванных хроническими и сердечно-сосудистыми заболеваниями (ССЗ). ССЗ – это заболевания, поражающие кровеносные сосуды и сердце. ССЗ, поражающие кровеносные сосуды, известны как сосудистые заболевания, такие как ишемическая болезнь сердца. К заболеваниям, связанным с сердцем, относятся сердечная недостаточность, кардиомиопатия, ревматические заболевания сердца, инсульт, сердечный приступ и аритмии. Непрерывный мониторинг сердечного ритма и немедленное обнаружение аритмий в сердцебиении являются основными задачами современного здравоохранения. Экспериментальные данные показали, что многие сердечно-сосудистые заболевания можно лучше диагностировать, контролировать и предотвращать посредством постоянного мониторинга, а также анализа сигналов электрокардиограммы (ЭКГ) [1, 2]. Таким образом, сегодня мониторинг физиологических сигналов сердечно-сосудистой системы (ССС) является целостной парадигмой ранней диагностики, контроля и профилактики заболеваний. Основными физиологическими параметрами, используемыми для оценки ССС, остаются частота сердечных сокращений (ЧСС) и вариабельность сердечного ритма (ВСР), отражающими регуляцию вегетативной нервной системы и общее самочувствие. ЧСС показывает количество сердечных сокращений в минуту, а ВСР указывает изменение времени между двумя последовательными сердечными сокращениями или интервалами между сердечными сокращениями. Сегодня традиционным способом анализа ЧСС является выделение времени регистрации высшей точки R в QRS - комплексе на электрокардиограмме (ЭКГ). Данный метод, первоначально разработанный ещё в 1985 году [3, 4], хорош, в первую очередь, своей простотой и возможностью реализации даже на самых простых электронных схемах. В то же время, применение классического подхода для детектирования сердечного ритма может быть весьма затруднено в случаях аритмии, когда R-зубец деформируется, изменяя свою выраженность и форму от цикла к циклу сердечного сокращения. Развитие современных методов нелинейной динамики открывает новые возможности для более элегантного и корректного решения уже давно известных задач, в частности, одна из недавно предложенных модификаций классического метода частотно-временного анализа является подход колебательных паттернов [5 – 8] может позволить весьма изящно решить задачу ведения ВСР.

В данной работе представлен новый подход к детекции сердечного ритма, основываясь на применении такого метода частотно-временного анализа, как оценка колебательных паттернов непрерывного вейвлетного преобразования.

Выделение сердечного ритма может быть выполнено с помощью одной и той же методики, применяемой к сигналам электрокардиограммы или фотоплетизмограммы. Разработанный подход апробирован на зарегистрированных электрокардиограммах и фотоплетизмограммах (стандартная запись на безымянном пальце левой руки и дифференциальный сигнал), записанных у 40 здоровых добровольцев. Было проведено сравнение со стандартным методом выделения ритма сердечных сокращений из анализа формы R – пиков, показавшее на основании ряда статистических оценок хорошую степень соответствия результатов предложенного метода с классическим, не превышающую 3.41%. Искажения формы сигнала и его зашумленность не оказывает влияния на качество детекции сердечного ритма с использованием представленного метода, не требуя дополнительной фильтрации или изменений в исполняемом алгоритме, что продемонстрировано на основе обработки дифференциального сигнала PPG. Предложенный метод при позволяет приобретать информацию о ритме сердечных сокращений с большой эквидистантной частотой дискретизации.

*Работа выполнена в рамках финансовой поддержке Российского научного фонда (проект 24-24-00333).*

#### **Библиографический список**

1. *Hassan M. F., Lai D., Bu Y.* // Proceedings of the 2019 3rd International Conference on Computational Biology and Bioinformatics. 2019. Pp. 76-79.
2. *Bsoul M., Minn H., Tamil L.* // IEEE transactions on information technology in biomedicine. 2010. V. 15 (3). Pp. 416-427.
3. *Pan J., Tompkins W. J.* // IEEE transactions on biomedical engineering. 1985. №. 3. Pp. 230-236.
4. *Hamilton P. S., Tompkins W. J.* // IEEE transactions on biomedical engineering. 1986. №. 12. Pp. 1157-1165.
5. *Runnova A. et al.* // Scientific reports. 2021. V. 11(1) P. 18505.
6. *Zhuravlev M. et al.* // The European Physical Journal Special Topics. 2024. V. 233. Pp. 505-518.
7. *Ulyanov V. et al.* // The European Physical Journal Special Topics. 2024. V. 233. Pp. 519-530.
8. *Simonyan M. et al.* // The European Physical Journal Special Topics. 2023. V. 232. №. 5. Pp. 595-603.

## ИССЛЕДОВАНИЕ ОСОБЕННОСТЕЙ В ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ АКТИВНОСТИ ГОЛОВНОГО МОЗГА ПРИ СИНДРОМЕ ОБСТРУКТИВНОГО АПНОЭ СНА

М.О. Журавлёв<sup>1,2</sup>, А.Е. Руннова<sup>1,3</sup>, А.Р. Киселев<sup>1</sup>, М.А. Симонян<sup>3</sup>,  
О.М. Драпкина<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Национальный медицинский исследовательский центр терапии и профилактической медицины Министерства здравоохранения

<sup>2</sup>Саратовский национальный исследовательский государственный университет имени Н.Г. Чернышевского

<sup>3</sup>Саратовский государственный медицинский университет им. В.И. Разумовского Минздрава России.

E-mail: [zhuravlevmo@gmail.com](mailto:zhuravlevmo@gmail.com)

В настоящее время особое внимание уделяется изучению нарушений сна [1-5]. Такой интерес к этой проблеме обусловлен тем, что ранняя диагностика и лечение этих расстройств у пациентов позволяет преодолеть заболевания, приводящие к таким расстройствам [3, 4], и может значительно улучшить качество жизни пациентов. Одним из основных инструментов диагностики нарушений сна является полисомнография, включающая запись электроэнцефалографии, электромиографию, электрокардиографию и мониторинг дыхания во время сна [5].

Синдром обструктивного апноэ во время сна (СОАС) характеризуется повторяющимися эпизодами полной (апноэ) и частичной (гипопноэ) обструкции верхних дыхательных путей, что приводит к перемежающейся гипоксемии, вегетативным нарушениям и фрагментации сна со снижением времени глубокого сна и последующей дневной сонливостью [1]. Примерно 34% и 17% мужчин и женщин (старше 18 лет) соответствуют диагностическим критериям СОАС [2, 3].

Сегодня на базе визуализационных исследований доказано, что головной мозг пациентов с СОАС характеризуется уменьшением объема серого вещества, нарушением целостности белого вещества и активности в покое [4, 5]. Пациенты с СОАС демонстрируют устойчивое изменение мощности нейрофизиологических коррелятов на электроэнцефалограммах (ЭЭГ) [6].

Простой анализ частотных компонентов ЭЭГ может дать поверхностное представление о признаках заболевания в динамике электрической активности и выявить диагностические биомаркеры СОАС, однако, для прицельного исследования характера изменений функционального состояния головного мозга и межнейронных взаимодействий при СОАС и других нарушениях сна полезным представляется анализ взаимодействия различных зон активности головного мозга на основе регистрации многоканальной ЭЭГ с использованием различных методов математического анализа полученных сигналов.

В данной работе предлагается подход к анализу полисомнографических записей, связанный с оценкой степени синхронизации между различными каналами ЭЭГ во время ночного мониторинга в разных частотных диапазонах. Для оценки степени синхронизации между различными каналами данных ЭЭГ был

использован метод, основанный на использовании вейвлет-бикогерентности [7, 8].

Регистрация полисомнографических записей проводилась для пятнадцати условно здоровых пациентов и десяти пациентов с синдромом обструктивного апноэ, при этом для каждого из пациентов было проведено по две регистрации полисомнографии в разные дни. Далее, используя метод вейвлет-бикогерентности для оценки степени синхронизации, был проведен анализ многоканальных записей ЭЭГ для условно здоровых субъектов и для пациентов с синдромом обструктивного апноэ. На первом этапе вычисляются комплексные коэффициенты непрерывного вейвлет-преобразования для каждого канала ЭЭГ, затем на основе взаимного вейвлет-спектра сигналов оценивается вейвлет-бикогерентность.

Была определена зависимость степени синхронизации между различными парами каналов ЭЭГ от времени для всего массива данных без разделения на стадии сна. Для каждой пары каналов были построены распределения вероятностей степени синхронизации для семи диапазонов частот, традиционных для современной нейробиологии [9]:  $\Delta f_1[0,5-4,5]$  Гц,  $\Delta f_2[4-8]$  Гц,  $\Delta f_3[8-12]$  Гц,  $\Delta f_4[12-14]$  Гц,  $\Delta f_5[12-20]$  Гц,  $\Delta f_6[20-30]$  Гц и  $\Delta f_7[30-40]$  Гц. Было показано, что для пациентов с синдромом обструктивного апноэ во сне наблюдается общее снижение синхронизации между левым и правым полушариями в области низких частот по сравнению с условно здоровыми пациентами. В то же время с увеличением частоты различия в степени синхронизации между левым и правым полушариями для обеих групп пациентов уменьшаются и не наблюдаются в диапазоне частот порядка  $\Delta f_6[20-30]$  Гц и  $\Delta f_7[30-40]$  Гц. Таким образом, предложенный подход позволяет без разделения на стадии сна выявлять пациентов с синдромом обструктивного апноэ.

*Исследование проведено в рамках научной работы «Разработка алгоритмов распознавания маркеров нарушений дыхания во сне у пациентов с различными формами сердечно-сосудистой патологии», выполняемой в ФГБУ «НМИЦ ТПМ» Минздрава России в соответствии с государственным заданием Минздрава России на 2022-2024 гг.*

#### Библиографический список

1. Tietjens J. R. et al. // J. Am. Heart Assoc. 2019. V. 8. No. 1. P. e010440.
2. Peppard P. E. et al. // Am. J. Epidemiol. . 2013. V. 177. No. 9. P. 1006-1014.
3. Senaratna C. V. et al. // Sleep. Med. Rev. 2017. V. 34. P. 70-81.
4. Kumar R. et al. // J. Neurosci. Res. V. 90. No. 10. P. 2043-2052.
5. Macey P. M. et al. // Sleep. 2008. V. 31. No. 7. P. 967-977.
6. Kang J. M. et al. // Sci. Rep. 2020. V. 10. No. 1. P. 6135.
7. A. E. Hramov et al. // Springer Berlin Heidelberg. 2015.
8. V. V. Makarov et al. // Physical Review E. 2018. V. 98. P. 062413.
9. Riedner B. A. et al. // Progress in brain research. 2011. V. Pp. 201-218.

## РЕКОНСТРУКЦИЯ МОДЕЛЬНОГО УРАВНЕНИЯ СИСТЕМЫ РЕГУЛЯЦИИ СРЕДНЕГО АРТЕРИАЛЬНОГО ДАВЛЕНИЯ КРЫСЫ ПО ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫМ ДАННЫМ

Ю.М. Ишбулатов<sup>1,2</sup>, О.С. Тарасова<sup>3</sup>, А.С. Боровик<sup>4</sup>, А.М. Вахлаева<sup>2</sup>, Б.П.  
Безручко<sup>1,2</sup>, А.С. Караваев<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>Саратовский филиал ИРЭ им. В.А. Котельникова РАН.

<sup>2</sup>Саратовский национальный исследовательский государственный университет  
им. Н.Г. Чернышевского

<sup>3</sup>Московский государственный университет имени М.В.Ломоносова

<sup>4</sup>Институт медико-биологических проблем РАН

E-mail: [ishbulatov95@mail.ru](mailto:ishbulatov95@mail.ru)

Ряд патологий кровообращения обусловлен дисфункцией симпатического звена системы автономной регуляции кровообращения [1].

С позиции нелинейной динамики симпатическая регуляция описывается генератором с отрицательной запаздывающей обратной связью [2, 3], который демонстрирует устойчивые периодические колебания с частотой 0.1 Гц у человека и 0.4 Гц у крыс:

$$\varepsilon \dot{M}(t) = -M(t) + \alpha \operatorname{th}(\beta(M(t-\tau) + \gamma \dot{M}(t-\tau))), \quad (1)$$

где  $M$  – динамическая переменная, соответствующая среднему артериальному давлению,  $\tau = 0.74$  секунды – время запаздывания в петле обратной связи, инерционность  $\varepsilon = 2$ ;  $\alpha = -6$ ,  $\beta = 1.5$ ,  $\gamma = 0.03$  – параметры нелинейной функции. Перечисленные параметры обладают физиологическим значением и их непрямо́й оценка методом реконструкции модельного уравнения перспективна для медицинской диагностики. Представленная модель впервые была опубликована в работе [4], нами была добавлена возможность моделирования гистерезиса в нелинейности. Уравнение решалось методом Эйлера с шагом интегрирования 0.001 секунды затем перебиралось с частотой выборки 250 Гц.

В качестве метода реконструкции использовалась модификация предложенного ранее метода [5], основанного на проецировании временных рядов модели в пространство с координатами  $[\varepsilon' \dot{M}(t) + M(t); M(t-\tau') + \gamma' \dot{M}(t-\tau')]$ , где  $\varepsilon'$ ,  $\tau'$ ,  $\gamma'$  – пробные значения параметров  $\varepsilon$ ,  $\tau$ ,  $\gamma$ . Далее проводился прямой перебор данных параметров с параллельным наблюдением длины ломанной линии, соединяющей точки проекции. В случае полного соответствия пробных и истинных параметров, проекция приобретала вид нелинейной функции, а длительность ломанной становилась минимальной. Затем нелинейная функция вида  $y(x) = \alpha' \operatorname{th}(\beta' x)$  подгонялась к полученной проекции методом наименьших квадратов, с целью оценить параметры  $\alpha$  и  $\beta$ .

Первым этапом апробации алгоритма была реконструкция модельного уравнения (1), в том числе в присутствии измерительных шумов и шумов, добавленных в динамику системы. Был установлен алгоритм предварительной обработки данных – фильтрация гребенчатым фильтром, с полосами пропускания 0.38-0.42 Гц и 0.118-0.122 Гц, сохраняющим первую и третью гармоники. В отсутствие шумов, добавленных в динамику системы, метод оказался уязвимым для измерительных шумов, однако добавление шумов в динамику обогатило динамику

системы и увеличило устойчивость метода к шумам различной природы. Ошибка оценки наиболее важного параметра  $\tau$  не превышала 5% при измерительных шумах до 5% и шумах в динамике до 50%. Уровень шума оценивался как отношение дисперсии шума к дисперсии не зашумлённого сигнала. При этом реконструкция производилась по участкам временного ряда длительностью три периода колебаний с последующим усреднением по временному ряду.

Затем метод применялся к экспериментальным временным рядам артериального давления крысы, зарегистрированным катетером в бедренной артерии. Протокол предварительной обработки экспериментальных сигналов соответствовал протоколу обработки модельных данных, однако мы исключили из анализа участки сигналов с низкой амплитудой колебаний. Временные ряды реконструированных моделей количественно соответствовали экспериментальным сигналам. Оценки параметров оказались стабильными, с центром масс оценок  $\hat{\epsilon} = 0.13$ ,  $\hat{\tau} = 1.18$ ,  $\hat{\gamma} = 0.02$ ,  $\hat{\alpha} = -2.86$ ,  $\hat{\beta} = 0.80$ . Стабильность полученных оценок позволяет надеяться на то, что они отражают характеристики биологической системы.

*Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 23-12-00241*

#### Библиографический список

1. Scott-Solomon E., Boehm E., Kuruvilla R. // Nat. Rev. Neurosci. 2021. V. 22(11). P. 685.
2. Prokhorov M.D., Karavaev A.S., Ishbulatov Yu.M. et al. // Phys. Rev. E. 2021. V. 103(4). P. 042404.
3. Ишбулатов Ю.М., Караваев А.С., Пономаренко В.И. и др. // Изв. Саратов. ун-та. Нов. сер. Сер. Физика. 2015. Т. 15(2), С. 32.
4. Ringwood J.V., Malpass S.C. // Am J Physiol Regul Integr Comp Physiol. 2001. V. 280(4). R1105.
5. Караваев А.С., Пономаренко В.И., Прохоров М.Д. // Письма в ЖТФ. 2001. Т. 27(10). С. 43.

## ИССЛЕДОВАНИЕ ЛЮМИНЕСЦЕНЦИИ ФОТОДИОДНЫХ СТРУКТУР В РЕЖИМЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПРОБОЯ

А.А. Казанков<sup>1,2</sup>, В.А. Сергеев<sup>1</sup>, И.В. Фролов<sup>1</sup>, О.А. Радаев<sup>1</sup>

<sup>1</sup>УФИРЭ им.В.А.Котельникова РАН.

<sup>2</sup>Ульяновский государственный технический университет

E-mail: [sva@ulstu.ru](mailto:sva@ulstu.ru)

Известно, что электрический пробой полупроводниковых структур сильно локализован и носит микроплазменный характер. Одним из основных проявлений микроплазменного эффекта в р–n-переходах является импульсный характер лавинного тока. Длительности импульсов и пауз между ними случайны. Микроплазменный пробой происходит, как правило, в областях протяженных дефектов, пересекающих активную область, и сопровождается свечением (люминесценцией). К дефектам относятся вакансии, дислокации, включения второй фазы, неоднородности в распределении легирующих примесей, наличие амфотерных примесей. Люминесценция, возникающая в режиме пробоя, обнаружена в различных классах полупроводниковых приборов, изготовленных по различным технологиям на основе различных материалов, в том числе в транзисторах [1], светодиодах [2, 3], фотодиодах [4].

Авторами разработаны экспериментальная установка и методика оценки параметров люминесценции локальных областей кристалла фотодиода в режиме электрического пробоя. Структурная схема экспериментальной установки, предназначенной для фото- и видеофиксации люминесценции локальных областей кристаллов фотодиодов в режиме электрического пробоя, представлена на рис. 1.

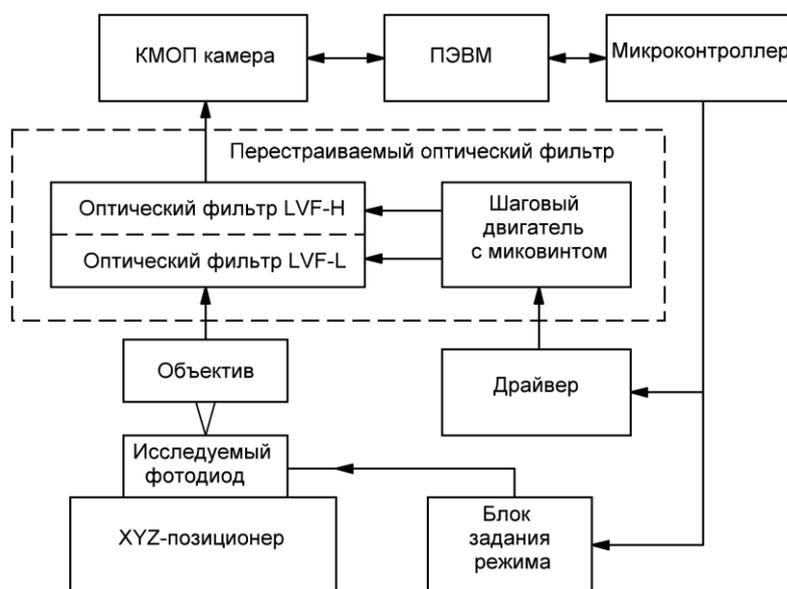


Рис. 1. Структурная схема экспериментальной установки.

Для оценки амплитуд спектральных составляющих оптического излучения микроплазм используются интерференционные перестраиваемые фильтры серии LVF Ocean Optics, граничная длина волны которых линейно изменяется

вдоль одной из осей фильтра. Для перестройки фильтров применяется шаговый двигатель совместно с микрометрическим винтом.

В качестве объектов исследования выбраны промышленные фотодиоды ФД-256, ФД-24К и PDB-C156. При помощи специально разработанного блока задания режима фотодиоды подавалось постоянное обратное смещение в диапазоне значений от 0 до 300 В. Напряжение плавно увеличивалось до появления и регистрации видеокамерой локальных пробоев структуры (светящихся точек на поверхности кристалла).

Экспериментально получено пространственное распределение локальных пробоев по поверхности кристаллов исследуемых фотодиодов (рис. 2). В результате обработки изображения при помощи разработанного авторами алгоритма [5] выделены локальные области, отмеченные на рисунках. При этом максимумы спектральных составляющих оптического излучения микроплазм находятся в ближнем ИК диапазоне.

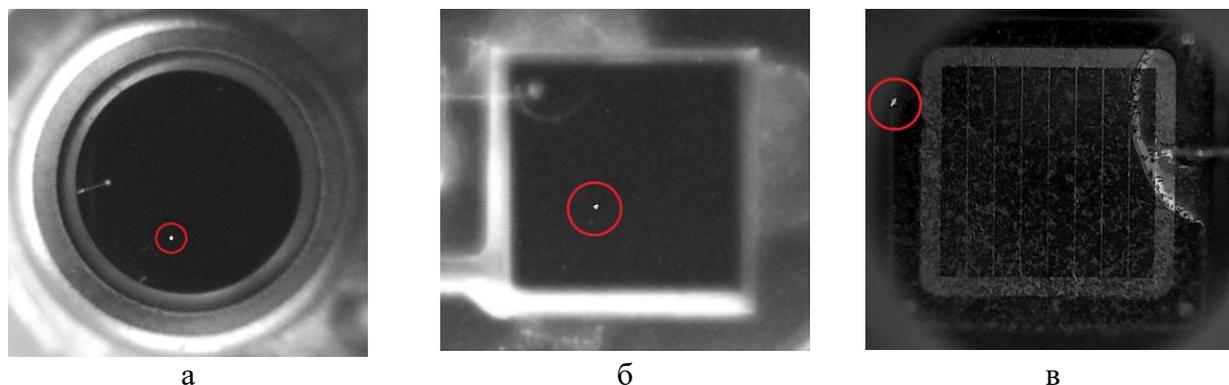


Рис. 2. Схематическое изображение распределение локальных пробоев по поверхностям кристаллов фотодиодов ФД-24К (а), PDB-C156 (б), ФД-256 (в).

В докладе описана экспериментальная установка для оценки излучения локальных пробоев, произведена экспериментальная апробация на образцах промышленных фотодиодов. Полученные результаты показывают, что в исследуемых образцах, как правило, существует одна основная область пробоя, которая находится непосредственно в краевой области кристалла (ФД-256), либо в близкой к охранному кольцу области (ФД-24К).

*Работа выполнена в рамках государственного задания УФИРЭ им. В.А. Котельникова РАН.*

### Библиографический список

1. *Tabib-Azar M., Pai P.* // *Micromachines* 2017, 8(4), 117
2. *Bercha A., Sakowski K., Muziol G., Hajdel M., Trzeciakowski W.* // *Physical Review Applied* 2024, 21(5). DOI: 21. 10.1103/PhysRevApplied.21.054030
3. *Cao J., Cai Q., You H., et al.* // *Appl. Phys. 2023 Lett.* 123, P. 121109
4. *Сергеев В.А., Казанков А.А., Фролов И. В., Радаев О. А.* // *Современные технологии обработки сигналов (СТОС-2023)* – Москва: РНТОРЭС им. А.С. Попова, 2023. – С. 121-124.
5. *Сергеев В.А., Казанков А.А., Фролов И. В., Радаев О. А.* // *Вузовская наука в современных условиях: сборник материалов 58-й научно-технической конференции.* – Ульяновск : УлГТУ, 2024. – С. 37-39.

## МЕТОД ИССЛЕДОВАНИЯ КОНТУРОВ ВЕГЕТАТИВНОЙ РЕГУЛЯЦИИ КРОВООБРАЩЕНИЯ НА ОСНОВЕ АНАЛИЗА СТАТИСТИЧЕСКИХ СВОЙСТВ РАЗНОСТЕЙ МГНОВЕННЫХ ФАЗ

**П.В. Квасневская**

*Саратовский национальный исследовательский государственный университет*

*им. Н.Г. Чернышевского*

*E-mail: [kvasnevskayap@mail.ru](mailto:kvasnevskayap@mail.ru)*

Количественная оценка взаимодействия контуров вегетативной регуляции кровообращения показала свою эффективность для выявления патологий сердечно-сосудистой системы [1-3], диагностики стресса [4,5], исследования мозга [6], автоматической классификации стадий сна [7,8], в том числе в процессе здорового старения [9]. В данной работе проводится исследование статистических свойств распределений разностей мгновенных фаз низкочастотных колебаний контуров вегетативной регуляции кровообращения при анализе сигналов RR-интервалов и фотоплетизмограммы 112 здоровых испытуемых, 63 человек с впервые выявленной гипертонией [8] и 120 человек, перенесших инфаркт миокарда [10]. В ходе анализа экспериментальных данных проведено сопоставление четырех количественных индексов оценки статистических свойств распределений разностей мгновенных фаз: для анализа разности мгновенных фаз LF-колебаний вычислялись количественные индексы: суммарный процент фазовой синхронизации  $S$  [11]; коэффициент фазовой когерентности  $\rho$  [12]; стандартное отклонение фазового шума разности фаз  $\sigma$ , коэффициент концентрации Джини распределения свернутой разности мгновенных фаз  $G$  [13]. Для всех трех групп испытуемых были попарно оценены межгрупповые различия с помощью T-критерия Стьюдента [14] и U-критерия Манна-Уитни [15].

На рисунке 1 представлены результаты анализа статистических свойств распределений разностей мгновенных фаз LF-колебаний контуров вегетативной регуляции кровообращения для сопоставляемых групп. Процент фазовой синхронизации среди испытуемых колеблется от 13.06% до 92.77%. Попарное сравнение значений с использованием U-критерия Манна-Уитни и T-критерия Стьюдента (рис. 1a) выявило значимые различия между здоровыми добровольцами и пациентами с артериальной гипертензией или инфарктом миокарда, с более высокими показателями у здоровых. Коэффициент фазовой когерентности варьируется от 0.01 до 0.86, и его значения у пациентов с инфарктом миокарда значительно ниже по сравнению с другими группами (рис. 1b). Уровень фазового шума варьируется от 0.06 до 0.18, с более низкими значениями у пациентов с артериальной гипертензией (рис. 1c). Коэффициент концентрации Джини варьируется от 0.09 до 0.79, при этом у пациентов с инфарктом миокарда значения значительно ниже, чем у других групп (рис. 1d).

В ходе данной работы проведено изучение возможности диагностики состояния пациентов на основе оценки статистических свойств распределений разностей мгновенных фаз низкочастотных колебаний контуров вегетативной регуляции кровообращения. Разработан метод исследования физиологического состо-

нения субъектов на основе анализа количественных характеристик статистических свойств разностей мгновенных фаз исследуемых колебательных процессов биофизической природы в ходе анализа сигналов ФПГ и RR-интервалов. Проведено сопоставление разработанных индексов в ходе анализа экспериментальных данных здоровых добровольцев и пациентов, страдающих заболеваниями органов системы кровообращения, включая инфаркт миокарда и артериальную гипертензию. На основании полученных результатов сделан вывод о возможности использования предложенных количественных индексов для диагностики заболеваний органов системы кровообращения.

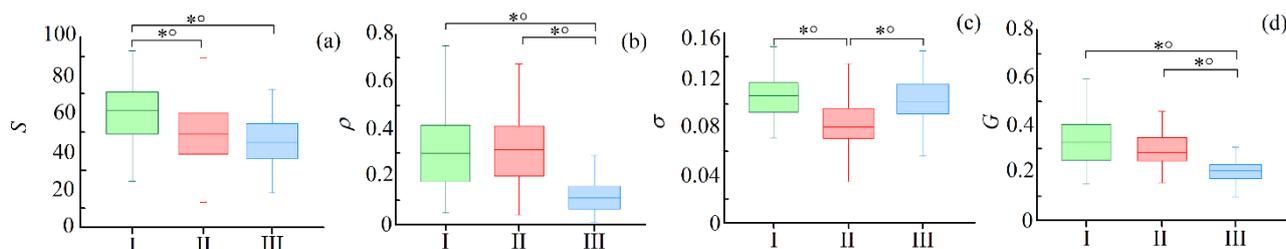


Рис. 1. Распределение значений индексов для всех испытуемых: (a)  $S$ ; (b)  $\rho$ ; (c)  $\sigma$ ; (d)  $G$ . I – здоровые; II – гипертоники; III – инфаркт миокарда. Уровень значимости различий между группами: “\*” –  $p < 0.01$  для Т-критерия Стьюдента; “°” –  $p < 0.01$  для U-критерия Манна-Уитни.

Работа выполнена в рамках проекта РНФ N 23-12-00241

#### Библиографический список

1. V.A. Shvartz, A.S. Karavaev, E.I. Borovkova, S.A. Mironov, V.I. Ponomarenko, M.D. Prokhorov, Y.M. Ishbulatov, E.E. Lapsheva, V.I. Gridnev, A.R. Kiselev. // Russian Open Medical Journal. 2016. V. 2. P. 203.
2. А.Р. Киселев, В.И. Гриднев, А.С. Караваяев, М.Д. Прохоров, В.И. Пономаренко, О.М. Посененкова, Е.И. Боровкова, Б.П. Безручко. // Функциональная диагностика. 2011. V.4. P. 28.
3. О.С. Панина, А.Р. Киселев, Е.И. Боровкова, Ю.В. Черненко, В.В. Сказкина, В.И. Гриднев, Е.Н. Муреева, А.С. Караваяев. // Российский вестник перинатологии и педиатрии. 2018. V 4. P. 52.
4. M.D. Prokhorov, E.I. Borovkova, A.N. Hramkov, E.S. Dubinkina, V.I. Ponomarenko, Y.M. Ishbulatov, A.V. Kurbako, A.S. Karavaev. // Applied Sciences (Switzerland). 2023. V. 14. P. 8390.
5. E.I. Borovkova, A.N. Hramkov, E.S. Dubinkina, V.I. Ponomarenko, B.P. Bezruchko, Y.M. Ishbulatov, A.V. Kurbako, A.S. Karavaev, M.D. Prokhorov. // The EPJ. Special Topics. 2023. V.5. P. 625.
6. А.С. Караваяев, А.Е. Руннова, Е.И. Боровкова, Ю.М. Ишбулатов, В.С. Хорев, А.Р. Киселев, М.О. Журавлев, В.И. Пономаренко, М.Д. Прохоров, Б.П. Безручко, А.А. Короновский. // Саратовский научно-медицинский журнал. 2016. V. 4. P. 541.
7. E.I. Borovkova, M.D. Prokhorov, A.R. Kiselev, A.N. Hramkov, S.A. Mironov, M.V. Agaltsov, V.I. Ponomarenko, A.S. Karavaev, O.M. Drapkina, T. Penzel. // Frontiers in Network Physiology. 2022. V. 2. P. 942700.
8. A.S. Karavaev, V.V. Skazkina, E.I. Borovkova, M.D. Prokhorov, A.N. Hramkov, V.I. Ponomarenko, A.E. Runnova, V.I. Gridnev, A.R. Kiselev, T. Penzel. // Frontiers in Neuroscience. 2022. V. 15, P. 791510.
9. V.I. Ponomarenko, A.S. Karavaev, M.D. Prokhorov, E.I. Borovkova, A.N. Hramkov, T. Penzel, A.R. Kiselev // Chaos. 2021. T. 31. V 7. P. 073105.
10. A.Y. Schumann, R.P. Bartsch, T. Penzel, P.Ch. Ivanov, J.W. Kantelhardt. // Sleep. 2010. V. 33, P. 943.

11. *A.S. Karavaev, M.D. Prokhorov, V.I. Ponomarenko, A.R. Kiselev, V.I. Gridnev, E.I. Ruban, B.P. Bezruchko* // *Chaos*. 2009. V. 19, P. 033112.
12. *F. Mormann, K. Lehnertz, P. David, C.E. Elger*. // *Phys. D: Nonlin. Phenom.* 2000. V. 144, P. 358.
13. *C. Gini* // *Colorado College Publication*. 1936. V. 208, P. 73.
14. *P. Mishra, U. Singh, C.M. Pandey, G. Pandey* // *Ann Card Anaesth.* 2019. V. 22, P. 407.
15. *H.B. Mann, and D. R. Whitney* // *Annals of Mathematical Statistics*. 1947 V. 18, P. 50.

## ЭЛЕМЕНТЫ СОРБЦИОННОЙ СЕНСОРИКИ НА ОСНОВЕ ГРАФЕНОПОДОБНОЙ ПЛЕНКИ

В.С. Климин<sup>1</sup>

<sup>1</sup>ООО "Маннер".

E-mail: [klimin.v.s@mail.ru](mailto:klimin.v.s@mail.ru)

Графен, как функциональный материал микроэлектроники остается одним из наиболее перспективных материалов как настоящего, так и будущего [1,2]. Перспективы использования графена в нанoeлектронике включают создание транзисторов, светодиодов, гибких дисплеев и чувствительных сенсорных устройств [3]. Его высокая поверхностная чувствительность, низкое электрическое сопротивление и высокая поверхностная активность делают его идеальным материалом для детектирования различных газов. Газовые сенсоры на основе графена отличаются энергоэффективностью, компактными размерами и отсутствием необходимости подогрева [4]. Преимущества использования графена в газовой сенсорике включают в себя высокую чувствительность к различным газам, быстрый отклик на изменения в окружающей среде, возможность работы при комнатной температуре и простоту интеграции с другими электронными устройствами [5]. Кроме того, графен имеет большую поверхность, что увеличивает вероятность взаимодействия с молекулами газов и повышает чувствительность сенсора. Это позволяет детектировать даже очень малые концентрации газов в окружающей среде. Однако технология получения, совместимая со стандартными технологиями микроэлектроники, недефектного графена на большой площади остается недостаточно исследованной, поэтому научные работы в данной области являются весьма актуальными.

Целью данной работы являлось разработка технологии получения графеноподобного покрытия методами плазмохимического травления, для формирования элемента сорбционного датчика газов.

Графеноподобная пленка формируется на подложке карбида кремния методом плазмохимического травления в комбинированном плазменном разряде. Комбинированный разряд включает в себя индуктивно-связанную плазму и емкостную связанную плазму. Для обеспечения бездефектной графеноподобной пленки в данной работе проводились исследования технологии получения графеноподобной пленки методом двухэтапного плазмохимического травления в кислородсодержащей плазме и фторидной плазме. Фторидсодержащая плазма удаляла кремниевый компонент на поверхности карбида кремния, в то время как кислородсодержащая плазма удаляла углеродную компоненту. Проводя комбинированный цикл травления несколько раз с поверхности подложки удалялись дефектные слои карбида кремния, что подтверждалось АСМ исследованиями в режиме сопротивления растекание. После удаления дефектных слоев подложка карбида кремния обрабатывалась во фторсодержащей плазме для формирования графеноподобной пленки. В качестве фторсодержащего газа использовался гексафторид серы, в качестве кислородсодержащего газа использовался оксид азота. Для экспериментальных исследований была выбрана подложка 4H-SiC диамет-

ром 100 мм. На основе полученной графеноподобной пленки был изготовлен макет сорбционного сенсора газов, который показал чувствительность к аммиаку, угарному газу и метану.

#### Библиографический список

1. *Gleiter, H.* // Acta Materialia. 2000. V. 48. - №1. P. 1-29.
2. *Klimin V.S., Morozova Yu.V., et al.* // Russian Microelectronics. 2022. V. 51. № 4. P. 236-242.
3. *Nakamura S, Senoh M, et al.* // Japan. J. Appl. Phys. 1996. 35 L74
4. *Pant B. D., Tandon U. S.* // Plasma Chemistry and Plasma Processing. 1999. Vol. 19. P. 545.
5. *Efremov A. M., Murin D. B. et al.* // Russian Microelectronics. 2021. Vol. 50. P. 24.

## ФОРМИРОВАНИЕ МЕТАСТРУКТУР НА ПОВЕРХНОСТИ КРЕМНИЯ КОМБИНИРОВАННОЙ ФТОРИДНОЙ ГАЗОРАЗРЯДНОЙ ПЛАЗМОЙ

В.С. Климин<sup>1</sup>

<sup>1</sup>ООО "Маннер".

E-mail: [klimin.v.s@mail.ru](mailto:klimin.v.s@mail.ru)

На современном этапе развития микро- и нанoeлектроники плазмохимическое травление является одним из перспективных методов формирования кремниевых метаструктур [1-3]. Метод плазмохимического травления позволяет достичь очень малых размеров кремниевых метаструктур и обеспечивает высокую точность и контроль их формы [4,5]. Процесс формирования кремниевых метаструктур методом плазмохимического травления является быстрым и эффективным, что позволяет получать большие объемы наноструктур за короткий промежуток времени [6]. Кроме того, кремниевые метаструктуры, полученные методом плазмохимического травления, имеют огромную удельную поверхность, что делает их очень привлекательными для применения в различных областях науки и техники [7]. Все эти достоинства свидетельствуют об актуальности исследования применения метода плазмохимического травления для формирования кремниевых метаструктур [8].

Цель представляемого исследования заключается в изучении режимов наноразмерного профилирования поверхности кремниевых подложек плазмохимическим травлением во фторидной плазме при изменении потока фторсодержащего газа и времени обработки. Это исследование имеет большое значение для оптимизации процессов обработки и создания микро- и наноструктур с заданными параметрами.

Для этого была использована плазма гексафторида серы (SF<sub>6</sub>) в качестве источника. Проведенный анализ показал, что влияние шероховатости, высоты и угла наклона формируемых при травлении структур зависит как от времени плазмохимической обработки, так и от потока фторсодержащего газа. Морфология структур изучалась с использованием атомно-силовой микроскопии, и было установлено, что при увеличении времени обработки и потока газа зависимости возрастают линейно.

Для достижения необходимой конфигурации пластины важно правильно настроить параметры плазмы. Поток газа и время обработки являются ключевыми характеристиками при травлении, корректировка которых позволяет достичь желаемой формы структур. В данном исследовании исследовались зависимости геометрических параметров от потока газа и времени плазмохимической обработки.

Маскирующее покрытие для формирования метаструктур формировалось методом потической фотолитографии с использованием стойкого к плазме фоторезиста SPR-220. По сформированной маске проводилось плазмохимическое травление в комбинированной газоразрядной фторидной плазме, образованной смесью газов гексафторида и аргона (рис. 1). Использование комбинированного разряда позволяет достигнуть максимального разложения рабочего газа и направленного потока химически активных частиц к поверхности, что позволяет

управлять углом наклона метаструктур к поверхности. В результате экспериментальных исследований были получены метаструктуры проанализировав их методами атомной силовой микроскопии были получены зависимости [9]. Из зависимостей можно увидеть, что при увеличении времени плазменного травления обработки средняя шероховатость поверхности структур увеличивается [10]. Со временем на графике зависимости шероховатости метаструктур от времени образуется участок насыщения, значение шероховатости на этом участке остается практически неизменным, однако увеличивается значение максимального и минимального показателя шероховатости.

Экспериментальные исследования, проведенные в данной работе, позволили выявить закономерности влияния параметров плазмохимического травления на шероховатость сформированных кремниевых метаструктур, которые в свою очередь могут быть применены в оптоэлектронных приборах.

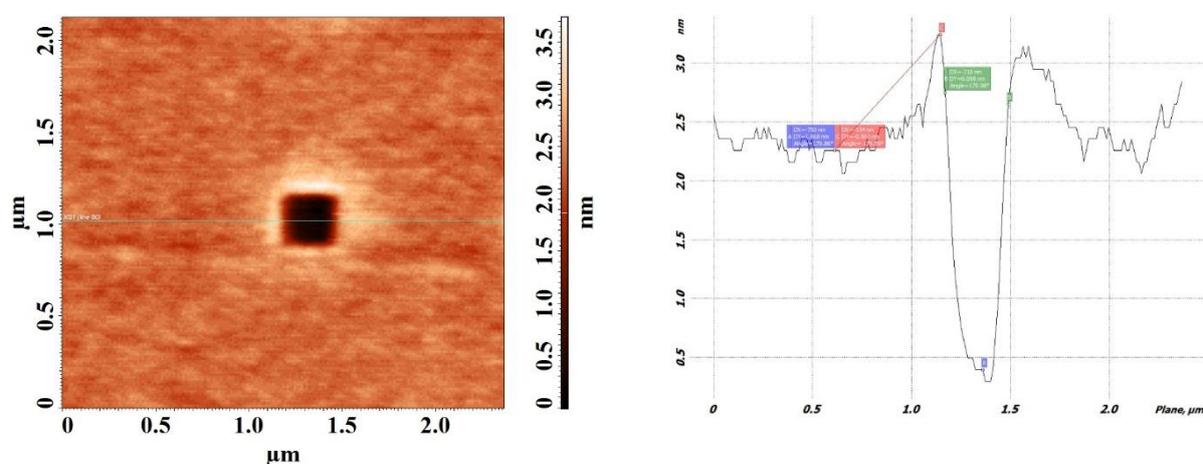


Рис. 1. АСМ изображение и профиллограмма полученной кремниевой структуры, методом плазмохимического травления.

### Библиографический список

1. Alvarez, H. S. et al. // Jour. of Microelectromechanical Sys. 2021. V. 30(4). P. 668–674.
2. Kots, I.N., Polyakova, V.V. et al. // Russian Microelectronics. 2022. с 51(3). P.126–133.
3. Efremov, A.M., Murin, D.B., Sobolev, A.M. et al. // Russ Microelectron. 2021. V. 50. P. 24–32.
4. Wu, J., Ye, X., Huang, J. et al. J. Wuhan // Univ. Technol.-Mat. Sci. 2018. V. 33. P. 349–355.
5. Bachurin, V.I., Izyumov, M.O. et al. // Bull. Russ. Acad. Sci. Phys. 2018. V. 82. P. 127–130.
6. Климин В.С., Кесслер И.О., et al. // Прикладная физика. 2022. V. 6. P. 23-28.
7. K. Zekentes, J. Pezoldt et al. // Materials Research Foundations. 2020. V. 69. P. 175-232.
8. Deenapanray, P. N. K., Athukorala, et al. // Res. and App. 2006. V. 14(7). P. 603–614.
9. Klimin, V.S., Morozova, Y.V., et al. // Russian Microelectronics. 2022. V. 51(4). P. 236–242.
10. Klimin, V.S., Kessler, I.O. et al. // Bull. Russ. Acad. Sci. Phys. 2022. V. 86. P. 96–99.

## МОДЕЛИРОВАНИЕ СИСТЕМЫ СОГЛАСОВАНИЯ ДЛЯ ЛАМПЫ БЕГУЩЕЙ ВОЛНЫ СУБТЕРАГЕРЦЕВОГО ДИАПАЗОНА С ЛЕСТНИЧНОЙ ЗАМЕДЛЯЮЩЕЙ СИСТЕМОЙ

Е.Е. Колесниченко<sup>1,2</sup>, А.А. Ростунцова<sup>1,2</sup>, Н.М. Рыскин<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>Саратовский филиал ИРЭ им. В.А. Котельникова РАН.

<sup>2</sup>Саратовский национальный исследовательский государственный университет им. Н.Г. Чернышевского

E-mail: [unikzena759@gmail.com](mailto:unikzena759@gmail.com)

Субтерагерцевый (суб-ТГц) диапазон охватывает частоты от 100 ГГц до 300 ГГц (волны длиной от 3 мм до 1 мм). Освоение этого диапазона имеет большую актуальность для различных приложений [1-2], в частности, одной из наиболее важных областей являются телекоммуникационные системы [2]. В суб-ТГц диапазоне могут быть созданы высокоскоростные беспроводные системы связи, способные передавать данные со скоростью до 100 Гбит/с.

В данной работе проводится исследование электродинамических характеристик лестничных замедляющих систем (ЗС) для лампы бегущей волны (ЛБВ) суб-ТГц диапазона. Лестничная ЗС представляет собой помещённую в волновод металлическую пластину с периодически вырезанными в ней щелями [3,4]. Предполагается, что взаимодействие осуществляется с двумя ленточными электронными пучками, распространяющимися сверху и снизу от пластины. В простейшем варианте, когда используется волновод прямоугольного сечения, основная гармоника ЗС является прямой и обладает сильной дисперсией, что затрудняет её использование в широкополосных усилительных ЛБВ. Представляют интерес модификации лестничной ЗС, в которых частота отсечки волновода  $f_c$  превышает резонансную частоту прямоугольной щели  $f_s = c/(2w_s)$ , что, в частности, может иметь место, когда волновод нагружен прямоугольными пазами (рис. 1). В таких системах основная гармоника обладает аномальной дисперсией, в то время как +1-ая гармоника является прямой, и на ней возможен синхронизм пучка с волной в широкой полосе частот, что может быть использовано для усиления в ЛБВ.

Разработана конструкция лестничной ЗС в волноводе с пазами W-диапазона. На рис. 2а приведена дисперсионная диаграмма основной моды, разработанной ЗС, рассчитанная в программном пакете COMSOL Multiphysics. Размеры паза оптимизированы таким образом, чтобы частота отсечки волновода превышала частоту щелевого резонанса ( $f_s \approx 90.85$  ГГц) и принимала максимально возможное значение ( $f_c = 110.8$  ГГц). Коэффициент замедления в диапазоне 95-110 ГГц слабо зависит от частоты и принимает значения 4.2–4.5 (см. рис. 2б). На расстояниях порядка 0.1 мм от пластины сопротивление связи, усредненное по сечению электронного пучка 0.1 мм × 1.0 мм, в рабочей полосе частот принимает значения 1–2 Ом, что позволяет обеспечить эффективное взаимодействие волны и электронного потока.

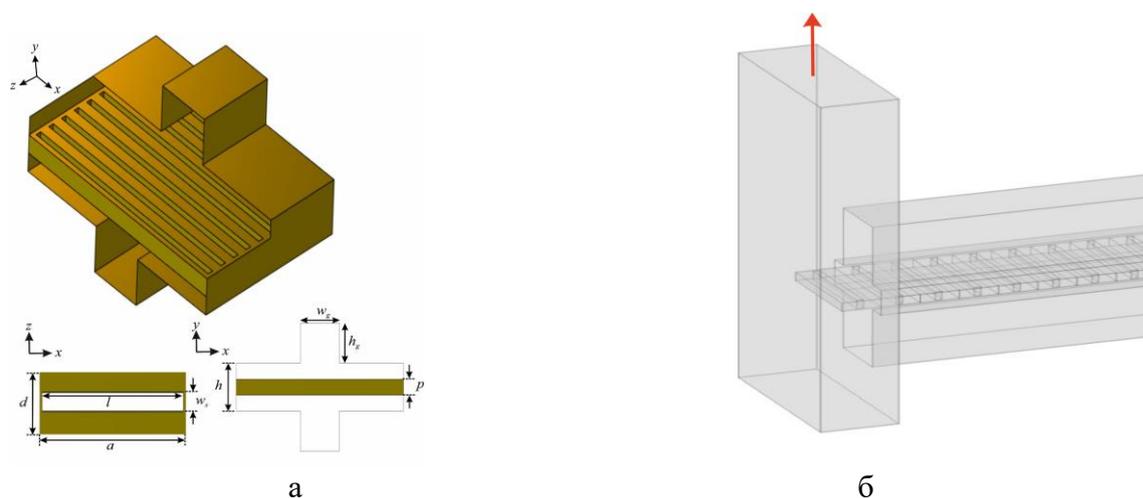


Рис. 1. Схема лестничной ЗС в волноводе с пазами (а) и вид входного волновода, осуществляющего широкополосное согласование системы

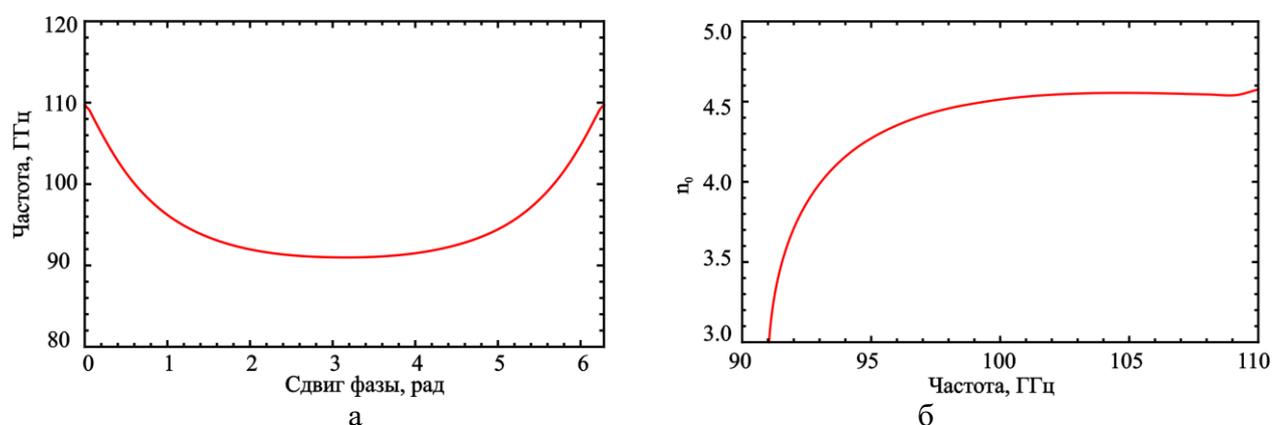


Рис. 2. Дисперсионная диаграмма основной моды разработанной ЗС (а) и коэффициент задержки на +1-й гармонике (б).

Для минимизации отражений в лестничной ЗС в волноводе с пазами была разработана система широкополосного согласования (см. рис. 1б). Согласование осуществляется за счёт входного и выходного прямоугольных волноводов, ориентированных в вертикальной плоскости, в которые металлическая пластина ЗС выступает на один период. Размеры системы согласования оптимизировались с целью достижения хорошего прохождения сигнала в окрестности 98-99 ГГц. Расчёты S-параметров в COMSOL для ЗС, состоящей из 40 периодов, показали, что в полосе частот 95-105 ГГц потери на отражения не превышают  $-10$  дБ. При этом коэффициент прохождения превышает  $-5$  дБ, т.е. затухание составляет не более 0.05 дБ на период.

*Работа выполнена при поддержке гранта РФФ № 22-12-00181.*

#### Библиографический список

1. Григорьев А.Д. *Терагерцовая электроника*. М.: Физматлит, 2021. 308 с.
2. THz Communications. Paving the Way Towards Wireless Tbps. Kürner T., Mittleman D.M., Nagatsuma T (eds.). Springer, 2022. 531 p.
3. Pierce J. // Trans. IRE on Electron Devices 1955. Vol. 2, No. 1. P. 13-24.
4. Butcher R. // Proc. IEE. 1957. Vol 104, Pt. B, No. 14. P. 169-176.

## ИССЛЕДОВАНИЯ ПРОЦЕССА ПЕРЕКРИСТАЛЛИЗАЦИИ МИКРОЧАСТИЦ ВАТЕРИТА, ВЫРАЩЕННЫХ НА ВОЛОКНАХ ПОЛИКАПРОЛАКТОНА, В КАЛЬЦИТ

**Н.В. Короневский, И.С. Великанов, А.А. Андреев, Б.В. Сергеева**

*Саратовский национальный исследовательский государственный университет*

*им. Н.Г. Чернышевского*

*E-mail: [kaskad\\_94@mail.ru](mailto:kaskad_94@mail.ru)*

В Саратовском национальном исследовательском государственном университете имени Н.Г. Чернышевского в течение последних лет активно исследуется нетканый композитный материал, представляющий собой минерализованные микрочастицами карбоната кальция волокна поликапролактона [1-10]. Данный материал применим в регенеративной медицине в качестве тканеинженерных имплантов, способствующих регенерации естественных тканей организма, а также может являться средством адресной доставки лекарственных препаратов. Однако способностью к загрузке веществ среди трех безводных аллотропных модификаций карбоната кальция обладает только ватерит. Микрочастицы подобного типа имеют пористую структуру, но нестабильны и со временем перекристаллизуются в кальцит, теряя пористость структуры и высвобождая загруженное вещество [11-18].

В данной работе исследовался процесс перекристаллизации синтезированных на волокнах поликапролактона микрочастиц ватерита в кальцит с помощью сканирующей электронной микроскопии и рентгеновской дифрактометрии. Два одинаковых фрагмента синтезированного описанным в работе [3] методом образца материала помещались в пробирки с деионизованной водой. Каждые три часа фрагменты извлекались из воды и просушивались, после чего проводился рентгеноструктурный анализ первого фрагмента и исследование сканирующей электронной микроскопией второго фрагмента. Эксперимент продолжался 24 часа, до завершения перекристаллизации ватерита в кальцит.

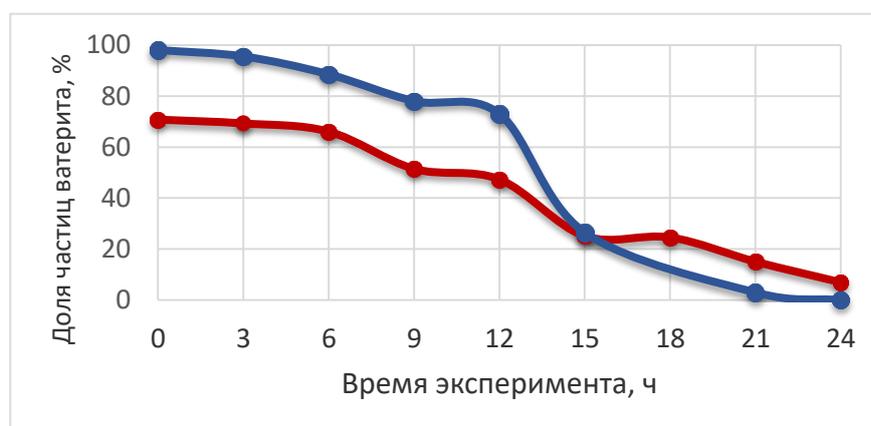


Рис. 1. Зависимости количественных (синяя линия) и массовых (красная линия) долей микрочастиц ватерита относительно микрочастиц карбоната кальция от длительности эксперимента.

Количественная доля веществ определялась после подсчета числа микрочастиц сферической формы (ватерита) и кубической (кальцита), соотношения выражались в процентах. Анализ массовой доли микрочастиц относительно общей массы карбоната кальция проводился методом Ритвельда. Зависимости массовых и количественных долей ватерита представлены на рисунке 1.

Определено время перекристаллизации микрочастиц ватерита на волокнах поликапролактона, а также показано, что результаты исследования, полученные с помощью рентгеновской дифрактометрии идентичны полученным в результате применения сканирующей электронной микроскопии.

#### Библиографический список

1. *Сергеев С.А., Короневский Н.В., Гулманов Э.Э., Сергеев Р.С.* // Электроника и микроэлектроника СВЧ. 2017. Т. 1. С. 155–159.
2. *Сергеев С.А., Короневский Н.В., Аткин В.С., Сергеев Р.С.* // НННФ: тезисы докладов. Саратов: Техно-Декор, 2017. С. 249–251.
3. *Короневский Н.В., Сергеев С.А., Ломова М.В., Савельева М.С.* Патент 2761321 РФ. Способ минерализации органических волокон поликапролактона микрочастицами карбоната кальция. № 2021101913; заявл. 28.01.2021; опубл. 07.12.2021. Бюл. № 34.
4. *Короневский Н.В., Сергеев С.А., Сергеева Б.В.* Патент 2820707 РФ, МПК А61L 27/04, D01F 11/12, А61F 2/00. Композитный материал. № 2023124062; опубл. 07.06.2024. 17 с.
5. *Короневский Н.В., Иноземцева О.А., Сергеева Б.В. и др.* // Перспективные материалы. 2024. № 6. С. 38–46.
6. *Короневский Н.В., Иноземцева О.А., Сергеева Б.В. и др.* // Известия Саратовского университета. Новая серия. Серия: Физика. 2023. Т. 23, вып. 2. С. 179–187.
7. *Koronevskiy N.V., Savelyeva M.S., Lomova M.V. et al.* // Izvestiya of Saratov University. Physics. 2022. V. 22(1). P. 62–71.
8. *Короневский Н.В., Сергеев Р.С., Савельева М.С., Сергеев С.А.* // Методы компьютерной диагностики в биологии и медицине. – Саратовский источник. 2017. С. 120–123.
9. *Короневский Н.В., Сергеев Р.С., Савельева М.С., Сергеев С.А.* // Актуальные вопросы биомедицинской инженерии. – Саратов: СГТУ, 2018. С. 38–42.
10. *Сергеев С.А., Короневский Н.В., Сергеев Р.С.* // Нано- и биомедицинские технологии. Управление качеством. Проблемы и перспективы. – Саратов: Техно-Декор, 2018. С. 76.
11. *Сергеев Р.С., Сергеева А.С., Ленгерт Е.В.* // Новые материалы и технологии: состояние вопроса и перспективы развития. – Саратов: Наука, 2014. С. 244–249.
12. *Сергеев Р.С., Сергеева А.С., Ленгерт Е.В., Сергеев С.А.* // Наноматериалы и нанотехнологии: проблемы и перспективы: сборник материалов конференции. – Москва: Прондо. 2014. С. 275–283.
13. *Sergeeva A., Sergeev R., Lengert E. et al.* // ACS Applied Materials & Interfaces. 2015. V. 7(38). P. 21315–25.
14. *Сергеева А.С., Сергеев Р.С., Сергеев С.А.* // Фундаментальные и прикладные аспекты новых высокоэффективных материалов. – Казань: ИП Синяев Д.Н., 2013. С. 139–141.
15. *Сергеева А.С., Сергеев Р.С., Сергеев С.А.* // Фундаментальные и прикладные аспекты новых высокоэффективных материалов. – Казань: ИП Синяев Д.Н., 2013. С. 142–144.
16. *Сергеев С.А., Михайлов А.И., Горин Д.А. и др.* // Полупроводниковая электроника и молекулярные нанотехнологии: Сб. статей. – Саратов: Наука, 2013. С. 214–228.
17. *Портнов С.А., Сергеев С.А., Иноземцева О.А. и др.* Физика и химия границ раздела фаз: учеб. пособие. – Саратов: Саратовский источник, 2015. 132 с.
18. *Сергеев С.А., Иноземцева О.А., Браташов Д.Н. и др.* Физика и химия коллоидных систем: учеб. пособие. – Саратов: Саратовский источник, 2016. 168 с.

**ИССЛЕДОВАНИЕ УПРАВЛЯЕМОГО ДВИЖЕНИЯ РОЛЛЕР РЕЙСЕРА****В.А. Краснова, Т.Б. Иванова**

ФГБОУ ВО «Удмуртский государственный университет».

E-mail: [vasilisakrasnova82@gmail.com](mailto:vasilisakrasnova82@gmail.com)

В данной работе мы рассматриваем задачу об управляемом движении роллер рейсера по плоскости. Роллер рейсер состоит из двух соединенных между собой (с помощью цилиндрического шарнира) платформ, которые могут свободно вращаться в горизонтальной плоскости независимо друг от друга (3D модель и фото натурального образца представлены на рис. 1). На каждой платформе находится жестко закрепленная колесная пара, состоящая из двух колес, лежащих на одной оси и вращающихся независимо друг от друга. При этом предполагается, что в точках контакта колес с плоскостью выполняются условия непроскальзывания (неголономная связь) и действует сила вязкого трения. Продвижение роллер рейсера реализуется за счет периодических колебаний платформ относительно друг друга. Мы предполагаем, что угол между платформами (управляющая функция) является заданной периодической функцией времени.



Рис. 1. (a) 3D модель и (b) фото натурального образца роллер рейсера

В работе [1] получены уравнения движения и показано, что в этом случае все траектории приведенной системы асимптотически стремятся к периодическим решениям. В данной работе исследуются траектории роллер рейсера, соответствующие этим периодическим решениям, в зависимости от параметров управления и массо-геометрических характеристик системы. Определены типы возможных траекторий и проанализирована зависимость средней скорости продвижения вдоль прямой и окружности от параметров.

Полученные теоретические результаты качественно согласуются с результатами экспериментов, которые были проведены для натурального образца, представленного на рис. 1, а также с результатами, полученными в [2, 3] для движения вдоль прямой. При моделировании и в ходе экспериментальных исследований сравнение проводилось по средней скорости продвижения роллер рейсера, которая достигалась прототипом в процессе движения из состояния покоя. Типовая траектория движения и соответствующий ей график изменения средней скорости продвижения вдоль окружности приведены на рис. 2.

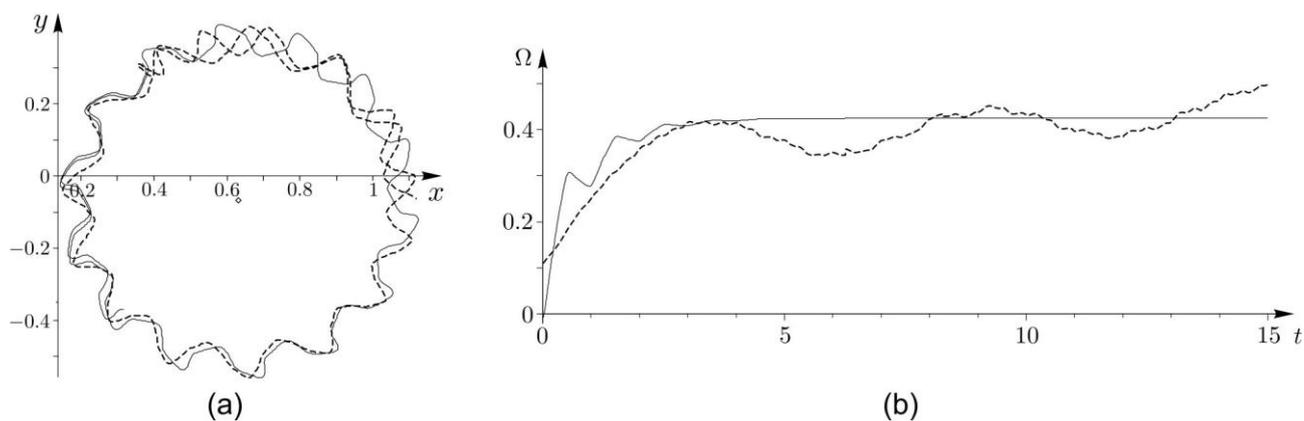


Рис. 2. (а) Сравнение результатов экспериментов (пунктирные кривые) и моделирования (сплошные кривые) движения роллер рейсера вдоль окружности: (а) траектории движения, (б) соответствующие им графики изменения скорости движения.

*Исследование выполнено в рамках выполнения государственного задания Минобрнауки России (FEWS-2024-0007).*

#### Библиографический список

1. Bizyaev, I. A., Borisov, A. V., and Mamaev, I. S. // *Reglar and Chaotic Dynamics*. 2018. V. 23(7). Pp. 983-994.
2. Yefremov K. S., Ivanova T. B., Kilin A. A., Karavaev Y. L. // *International Conference Nonlinearity, Information and Robotics – IEEE*. 2020. Pp. 1-5.
3. Kilin A. A., Karavaev Y. L., Yefremov K. S. // *Climbing and Walking Robots Conference: Robotics for Sustainable Future, CLAWAR 2021*. 2022. Pp. 428-437.

## СИСТЕМА ФИТЦХЬЮ-НАГУМО ПОД ВНЕШНИМ ВОЗДЕЙСТВИЕМ С АДАПТИВНОЙ ФАЗОЙ СИГНАЛА

Д.А. Крылосова<sup>1</sup>, П.В. Купцов<sup>1,2</sup>, А.П. Кузнецов<sup>2</sup>, Н.В. Станкевич<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Саратовский государственный технический университет им. Гагарина Ю.А.

<sup>2</sup>Саратовский филиал ИПЭ им. В.А. Котельникова РАН

E-mail: [krylosovadarina@gmail.com](mailto:krylosovadarina@gmail.com)

Многие системы, включая радиофизические, биологические и другие, демонстрируют колебательные процессы, при которых один объект, входящий в систему, воздействует на другой периодическим сигналом, но при изменении условий функционирования, частота воздействия изменяется. Например, в радиосвязи для обеспечения высокой стабильности приема используется фазовая автоподстройка частоты [1]. Система сердечно-сосудистой регуляции живых организмов с изменением нагрузки также изменяет частоту сердечных сокращений [2]. В таких взаимодействиях зависимость частоты от динамической переменной может привести к появлению сложного поведения в системе. Другие примеры подстройки известны в нейробиологии, заключающиеся в адаптации реакции скоростей нейронов [3]. Подстройка является общим принципом в нервной системе и происходит на разных уровнях обработки информации и в широком диапазоне различных временных масштабов. Такого рода подстройку можно назвать адаптацией системы на внешние стимулы, а саму систему обладающей адаптационными свойствами. Процесс адаптации будет зависеть от внутренних свойств самой системы. При такого рода взаимодействиях зависимость системы от внешнего воздействия может привести к возникновению в системе сложной динамики.

В данной работе в качестве объекта исследования такой системы рассматривается модель нейрона – модель ФитцХью-Нагумо [4], возбуждаемого внешним сигналом [5]. Исследуемая система уравнений имеет вид:

$$\begin{aligned} \dot{x} &= \varepsilon(y - a - bx) \\ \dot{y} &= y - \frac{y^3}{3} - x + I_{ext} \end{aligned} \quad (1)$$

где переменная  $y$  – потенциал мембраны клетки.

Для удобства преобразуем систему (1) к следующему виду:

$$\begin{cases} \dot{x} = \varepsilon(y - a - bx) \\ \dot{y} = y - \frac{y^3}{3} - x + A \sin(pt + kx) \end{cases} \quad (2)$$

Система имеет двумерное фазовое пространство, при этом 4 управляющих параметра. Параметр  $\varepsilon$  определяет соотношение временных масштабов каждой динамической переменной, его значение должно быть достаточно малым, поскольку для нейронных систем характерно быстро-медленная динамика. В наших численных экспериментах мы зафиксируем его так:  $\varepsilon=0.01$ .

Рассматривается влияния адаптивного воздействия на систему ФитцХью-Нагумо в режимах, соответствующих состоянию равновесия и генерации спай-

ков. Эти значения были получены с помощью метода изоклин для системы уравнений (1) при  $I=0$ . Таким образом были получены наборы параметров: а) устойчивое состояние равновесия при  $a=1$ ,  $b=1$ ,  $\varepsilon=0,01$ ; б) когда в системе три состояния равновесия - бистабильность, два стабильных и одно неустойчивое состояние равновесия при  $a=0$ ,  $b=2$ ,  $\varepsilon=0,01$ ; в)  $a=0$ ,  $b=0,5$ ,  $\varepsilon=0,01$  - неустойчивое состояние равновесия и имеется устойчивый предельный цикл.

Исследование проводилось методом карт динамических режимов. На рисунке 1 представлены карты системы (2) для значений параметров  $a=0$ ,  $b=0,5$ ,  $\varepsilon=0,01$  и значения  $k=10$ . Коэффициент  $k$  отвечает за адаптивность системы. При больших значениях коэффициента  $k$  ( $k=10$ ) структура бифуркации добавления периода и развитие хаоса изменяет свою форму, добавление периода происходит при больших значениях амплитуды, частота при этом не изменяется (для  $p>1$  развивается сложная динамика).

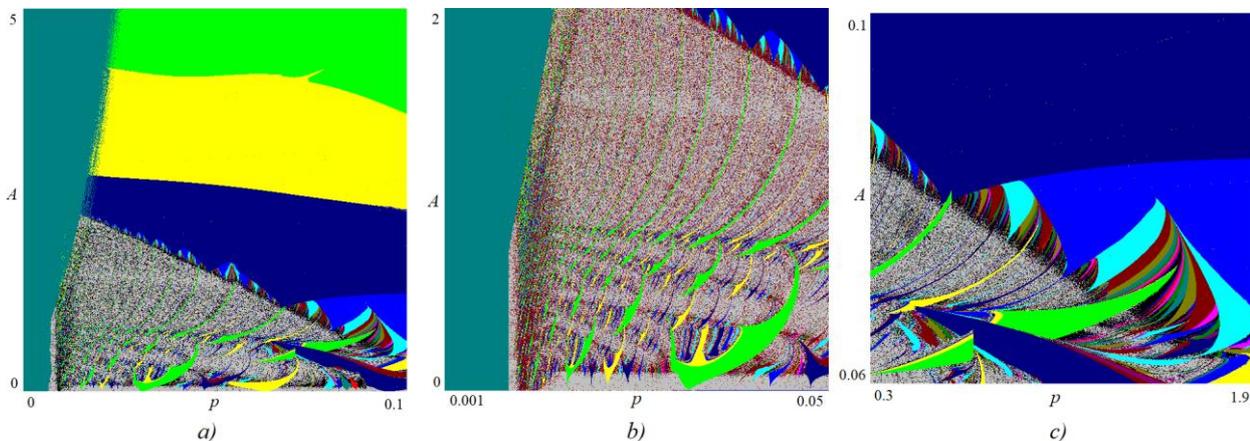


Рис. 1. а) Карта динамических режимов системы (2) на плоскости параметров ( $p$ ,  $A$ ) при:  $a=0$ ;  $b=0,5$ ;  $\varepsilon=0,01$ . б), в) ее увеличенные фрагменты.

### Библиографический список

1. Shalfeev, V.D. Nonlinear dynamics of the phase synchronization systems: Monograph / V.D. Shalfeev; V.V. Matrosov. // Nizhny Novgorod State University, 2013. P. 336.
2. Guyton, A.K. *Medical physiology* // Logosphere Publishing House, 2008. P. 1296.
3. Song S., Treves A. A, Yao H. *A modular latching chain* // Cognitive neurodynamics. 2014. V. 8. №1. P. 37–46.
4. FitzHugh R. *Mathematical models of threshold phenomena in the nerve membrane*. // Bull. Math. Biophysics. 1955. Vol. 17. P.257-278.
5. Krylova D.A., Seleznev E.P., Stankevich N.V. *Dynamics of Non-Autonomous Oscillator with a Controlled Phase and Frequency of External Forcing*. // Chaos, Solitons & Fractals. 2020. Vol. 134, № 5. P. 109716.

## ДИНАМИКА СВЯЗАННЫХ ДИСКРЕТНЫХ НЕЙРОНОВ КИАЛВО

А.П. Кузнецов<sup>1</sup>, Ю.В. Седова<sup>1</sup>, Н.В. Станкевич<sup>1,2</sup><sup>1</sup>Саратовский филиал ИПЭ им. В.А. Котельникова РАН<sup>2</sup>ВШЭ, Н. НовгородE-mail: [sedovayv@yandex.ru](mailto:sedovayv@yandex.ru)

В работе проведено исследование малоразмерных ансамблей отображений Киалво [1-7] – простейших дискретных моделей нейронов. Индивидуальное отображение имеет вид:

$$x_{n+1} = x_n^2 \exp(y_n - x_n) + I,$$

$$y_{n+1} = ay_n - bx_n + c.$$

Мы сконцентрировались на исследовании случаев, когда в поведении двух и трех связанных подсистем наблюдается множество несоизмеримых частотных компонент и могут реализоваться различные типы квазипериодических колебаний. Рассмотрена ситуация линейной (электрической) связи нейронов. Основным методом анализа был метод карт ляпуновских показателей, в рамках которого плоскость параметров окрашивается в разные цвета для разных типов режимов, определяемых по спектру показателей Ляпунова. Два связанных отображения демонстрируют возможность периодических режимов Р, режимов двухчастотной квазипериодичности 2Т и трехчастотной квазипериодичности 3Т, возникающей из двухчастотной в результате мягкой квазипериодической бифуркации Хопфа. В свою очередь, в трехчастотную область встроена система резонансных языков двухчастотных режимов, ограниченных линиями седло-узловых бифуркаций инвариантных кривых. Внутри языков наблюдаются бифуркации удвоения этих кривых. Возможен также хаос С и гиперхаос Н. Ляпуновская карта показана на рис.1.

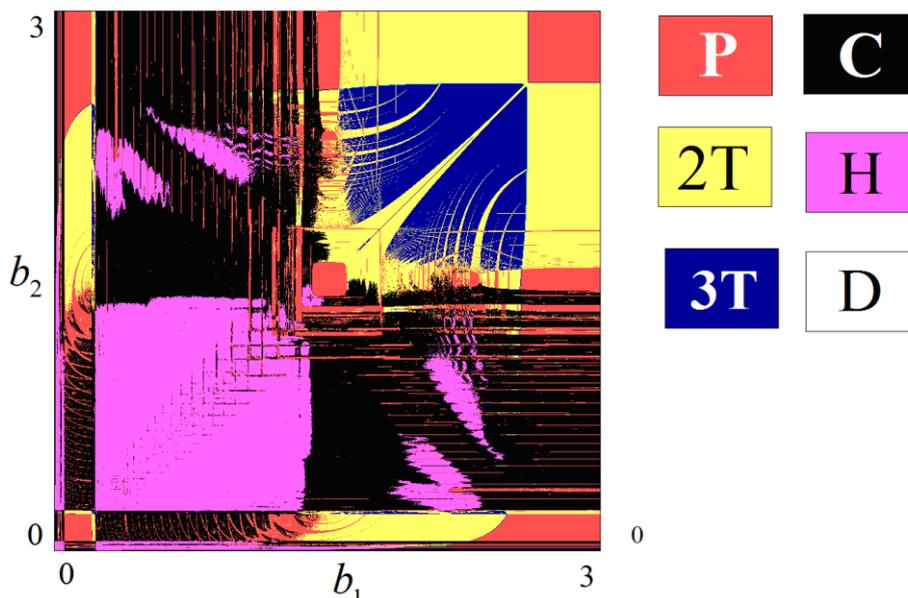


Рис. 1. Ляпуновская карта двух связанных нейронов.

Для трех связанных отображений становится возможной четырехчастотная квазипериодичность 4Т со встроенной системой языков трехчастотных режимов,

рис.2. В этом случае наблюдаются квазипериодические бифуркации Хопфа и седло-узловые бифуркации торов более высокой размерности.

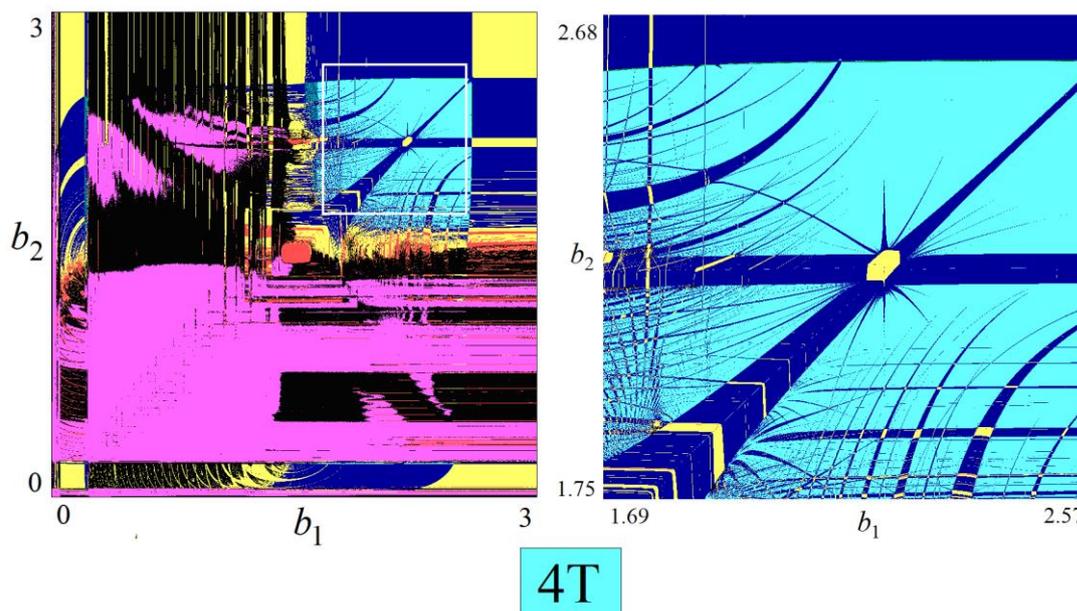


Рис. 2. Ляпуновская карта трех связанных нейронов и ее увеличенный фрагмент.

Исследовано также влияние шума на многочастотные режимы. При воздействии шума малой интенсивности «шумовые квазипериодические» режимы разной размерности сохраняются, демонстрируя спектр ляпуновских показателей с близкими к нулю соответствующими показателями. С ростом уровня шума многочастотные режимы последовательно разрушаются. Обнаружен эффект смещения языков резонансных двух- и трехчастотных торов в пространстве параметров при наличии шума. Полученные результаты и изложенные подходы могут использоваться при анализе других отображений размерности четыре и выше.

*Работа выполнена в рамках госзадания Института радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН.*

#### Библиографический список

1. Chialvo D.R. // Chaos, Solitons & Fractals. 1995. V. 5. No. 3-4. P. 461-479.
2. Wang F., Cao H. // Communications in Nonlinear Science and Numerical Simulation. 2018. V. 56. P. 481-489.
3. Stankevich N.V. et al. // Chaos, Solitons & Fractals. 2023. V. 172. P. 113565.
4. Bashkirtseva I. et al. // Communications in Nonlinear Science and Numerical Simulation. 2023. V. 116. P. 106867.
5. Pilarczyk P., Signerska-Rynkowska J., Graff G. // Chaos. 2023. V. 33. No. 4. P. 043110.
6. Yang Y. et al. // Advances in Neural Networks—ISNN 2020. P. 61-63.
7. Muni S.S., Fatoyinbo H.O., Ghosh I. // International Journal of Bifurcation and Chaos. 2022. V. 32. No. 9. P. 2230020.

## МОДЕЛИРОВАНИЕ НЕЙРОМОРФНОЙ ДИНАМИКОЙ ПРИ ПОМОЩИ НЕЙРОННЫХ СЕТЕЙ

**П. В. Купцов<sup>1</sup>**

<sup>1</sup>*Саратовский филиал ИРЭ им. В.А. Котельникова РАН.*

*E-mail: [kupav@mail.ru](mailto:kupav@mail.ru)*

Мы обсудим нейросетевое отображение, которое моделирует систему, описывающую поведение физиологического нейрона на основе формализма Ходжкина-Хаксли. Будет рассмотрено создание нейросетевой модели на основе векторного и скалярного временных рядов, будет показано как такая модель может обнаруживать режимы исходной системы, не предъявленные ей в ходе обучения, будет обсуждаться поведение связанных нейросетевых отображений, моделирующих взаимодействие физиологических нейронов.

## РАСПОЗНАВАНИЕ ПАТТЕРНОВ НА ИЗОБРАЖЕНИЯХ С ПОМОЩЬЮ СПАЙКОВОЙ НЕЙРОННОЙ СЕТИ С МАЛЫМ КОЛИЧЕСТВОМ НЕЙРОНОВ

А.В. Курбако<sup>1,2</sup>, Д.М. Ежов<sup>1</sup>, М.Д. Прохоров<sup>1,2</sup>, В.И. Пономаренко<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup> Саратовский национальный исследовательский государственный университет  
им. Н.Г. Чернышевского

<sup>2</sup> Саратовский филиал ИПЭ им. В.А. Котельникова РАН  
E-mail: [kurbako.sasha@mail.ru](mailto:kurbako.sasha@mail.ru)

В настоящее время исследование возможностей и применимости нейронных сетей привлекает внимание многих авторов. Нейронные сети используются для решения большого количества прикладных задач: кластеризации, классификации, прогнозирования, распознавания изображений, распознавания речи и других [1].

Наиболее реалистичными моделями нейронной сети головного мозга с физиологической точки зрения являются спайковые нейронные сети, которые используют биологически реалистичные модели нейронов. Использование таких сетей позволяет, как решать практические задачи с меньшим числом нейронов в сети, так и изучать работу мозга.

Существует ряд исследований, в которых для распознавания образов на изображениях используются нейронные сети со спайковой активностью [2, 3]. Сети, используемые для задач распознавания, часто состоят из большого количества нейронов. В этой работе мы исследуем возможность распознавания образов на изображении с помощью нейронной сети, состоящей из небольшого количества нейронов.

Спайковая нейронная сеть была обучена и протестирована на выборке, состоящей из 6000 изображений размером 3\*3 пикселя (4500 изображений — обучающая выборка и 1500 изображений — тестовая выборка). Мы используем две группы шаблонов, представляющих собой горизонтальные или вертикальные линии, расположенные в разных местах изображений. К изображениям добавляется равномерный шум таким образом, что белый пиксель имеет значение от 0.0 до 0.2, а черный пиксель имеет значение от 0.8 до 1.0. Примеры изображений представлены на рис. 1.

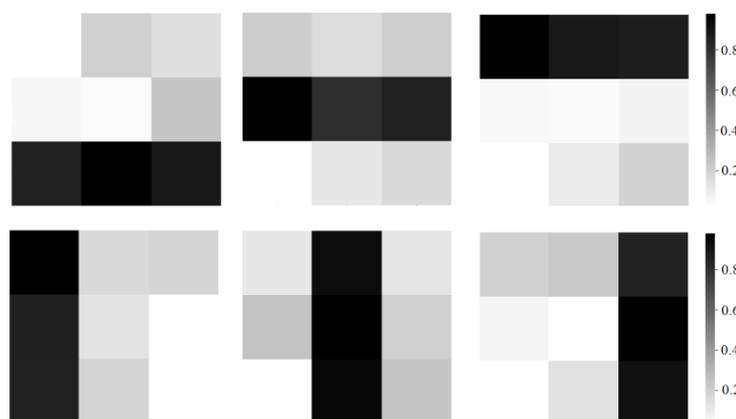


Рис. 1. Примеры изображений из обучающей и тестовой выборки.

Спайковая нейронная сеть состояла из одного слоя, состоящего из 6 Leaky Integrate-and-Fire (LIF) нейронов [4]. Сеть имела 9 входов, соответствующих 9 пикселям изображения, каждый из которых был связан с каждым нейроном сети. Веса связей в сети принимали значения от 0.0 до 1.0. Начальные веса связей в нейронной сети перед обучением задавались равномерно распределенными от 0.0 до 1.0. Нейронная сеть была обучена с использованием алгоритма spike-timing-dependent synaptic plasticity (STDP) [5], то есть сила связи между нейронами увеличивается, если постсинаптический нейрон генерирует спайк после генерации спайка в пресинаптическом нейроне. В противном случае сила связи уменьшается, если спайк пресинаптического нейрона происходит позже спайка в постсинаптическом нейроне. Параметры обучения были выбраны следующим образом:  $A_+ = 0.01$ ,  $A_- = -0.02$ ,  $\tau_+ = 20$  мс,  $\tau_- = 20$  мс (параметры обучения имеют смысл, аналогичный [5]).

Кластеризация данных проводилась с использованием метода  $k$ -средних, входными данными которого служил 6-мерный вектор, состоящий из числа спайков в сети, произошедших с момента начала показа изображения. Гистограммы, соответствующие изображениям из набора данных, показаны на рис. 2.

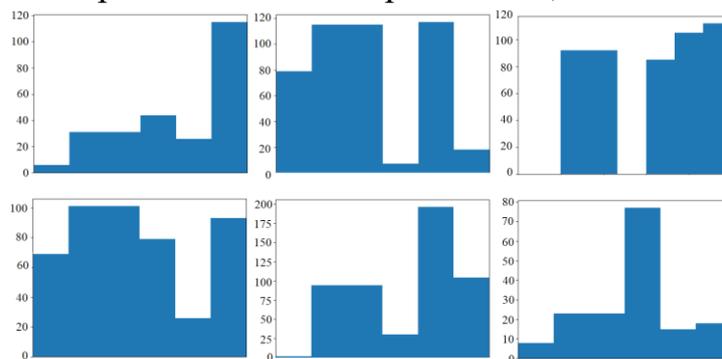


Рис. 2. Гистограммы нейронных спайков при предъявлении изображений с различными паттернами.

Показана принципиальная возможность использования спайковой нейронной сети, состоящей из малого числа нейронов, для распознавания горизонтальных и вертикальных паттернов на изображениях. Рассматриваемая спайковая нейронная сеть показала точность 99% на обучающем наборе и 97% на тестовом наборе.

*Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 23-12-00103.*

### Библиографический список

1. Y. Xiao // Computational and Mathematical Methods in Medicine. 2022. V. 2022. P. 5413202.
2. Diehl Peter, Cook Matthew // Frontiers in Computational Neuroscience. 2015. V. 9. Pp. 1-9.
3. T. Iakymchuk, A. Rosado-Munoz et al. // J Image Video Proc. 2015. V. 4. Pp. 1-11.
4. H. M. Lehmann, J. Hille, C. Grassmann and V. Issakov // 17th Conference on Ph.D Research in Microelectronics and Electronics (PRIME). 2022. Pp. 365-368.
5. S. Song, K. D. Miller, L.F. Abbott // Nature Neuroscience. 2000. V. 3. No. 9. Pp. 919-926.

## ВЛИЯНИЕ НЕОДНОРОДНОГО НАЧАЛЬНОГО ПОЛЯ СКОРОСТИ НА РАСЧЕТЫ ДВУМЕРНЫХ ТЕЧЕНИЙ ЖИДКОСТИ

Д.А. Лагунов, Е.М. Артемова

ФГБОУ ВО «Удмуртский государственный университет».

E-mail: [ldegos23@gmail.com](mailto:ldegos23@gmail.com)

Рассматривается влияние неоднородного начального поля скорости на двумерное установившееся течение вязкой жидкости в прямоугольной области. Движение вязкой несжимаемой жидкости описывается уравнениями [1]:

$$\frac{\partial \mathbf{v}}{\partial t} + (\mathbf{v} \nabla) \mathbf{v} = -\frac{1}{\rho} \nabla p + \nu \Delta \mathbf{v}, \quad \nabla \cdot \mathbf{v} = 0.$$

Обычно в численных расчетах начальное поле скорости выбирают равным нулю, считая, что неоднородность в начальный момент времени не оказывает влияние на решение. Тем не менее, неоднородное начальное поле скорости может приводить к проявлению неединственности решения уравнений Навье-Стокса.

Для построения неоднородного начального поля скорости используется метод, предложенный в работе [2]. Введем функцию завихренности потока жидкости:

$$\mathbf{w} = \nabla \times \mathbf{v}.$$

Применяя операцию ротора к функции завихренности в двумерном случае для начального поля скорости, получим следующие уравнения

$$\Delta v_x = -\frac{\partial w}{\partial y}, \quad \Delta v_y = \frac{\partial w}{\partial x}.$$

С учетом граничных условий, обозначенных на рис. 1 (слева), решение уравнений можно представить в виде разложение по собственным функциям оператора Лапласа [3]. Построенное решение должно удовлетворять условию несжимаемости жидкости и задавать ненулевую завихренность в системе, для этого необходимо было решать задачу минимизации. Результат решения представлен на рис. 1 (справа).

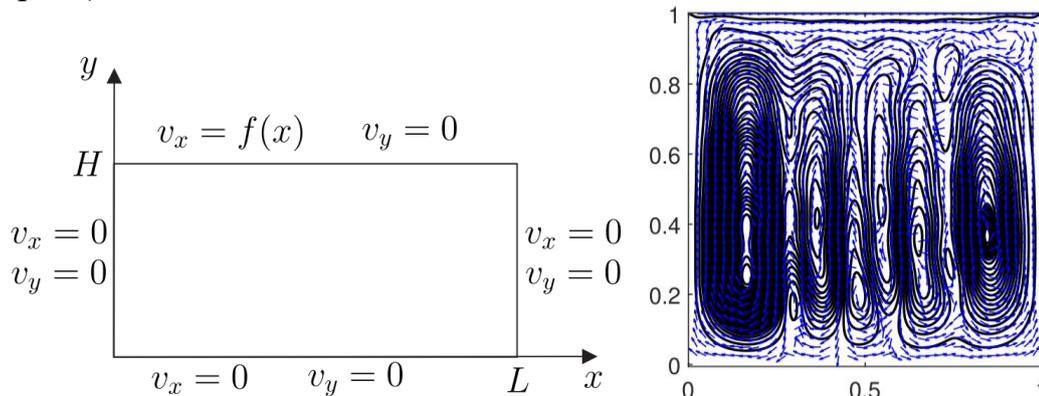


Рис.1. Слева - геометрия области. Справа – неоднородное начальное поле скорости для квадратной каверны.

Построенные поля скоростей (а также завихренности) использовались в качестве начальных условия для численного решения уравнений Навье-Стокса при

разных числах Рейнольдса. На рис. 2 и 3 приведены результаты моделирования: слева – установившиеся решения для однородного начального поля, справа – для неоднородного.

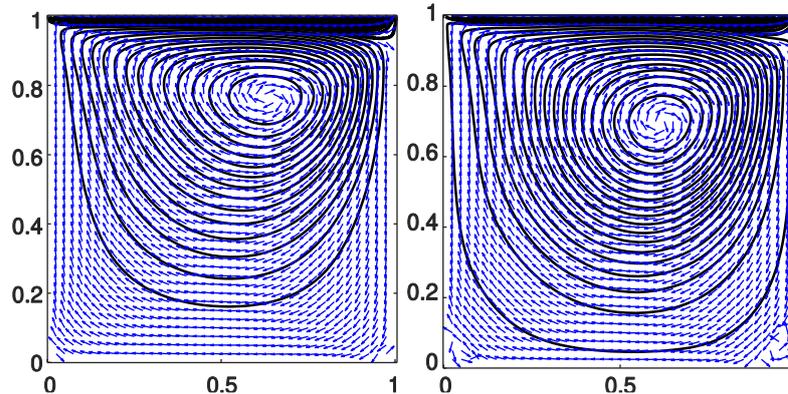


Рис. 2. Установившиеся течения в плоской квадратной камере при  $Re=100$ , слева - однородное начальное поле скорости, справа – неоднородное начальное поле.

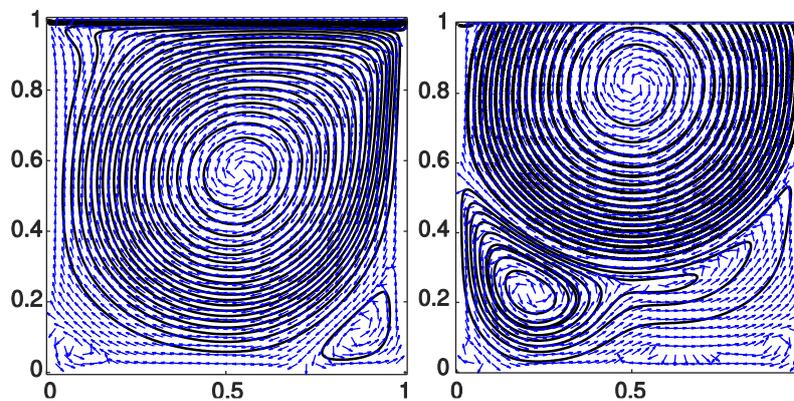


Рис. 2. Установившиеся течения в плоской квадратной камере при  $Re=1000$ , слева - однородное начальное поле скорости, справа – неоднородное начальное поле.

Таким образом, проведенные расчеты показывают (рис. 2 и 3), что различные начальные поля скорости могут эволюционировать к различным стационарным течениям при небольших числах Рейнольдса (до 1500).

*Исследование выполнено в рамках выполнения государственного задания Минобрнауки России (FEWS-2024-0007).*

#### Библиографический список

1. Валландер С. В. Лекции по гидроаэромеханике. – 1978.
2. Vetchanin E. V., Portnov E. A., *Construction of Inhomogeneous Velocity Fields Using Expansions in Terms of Eigenfunctions of the Laplace Operator* // Russian Journal of Nonlinear Dynamics, 2022. Vol. 18, no. 3. Pp. 441-464.
3. Тихонов А. Н. Самарский АА Уравнения математической физики //М: Наука. 1972. 762с.

## ЧАСТОТНАЯ ПЕРЕСТРОЙКА ЗАПРЕЩЕННЫХ ЗОН СПИНОВЫХ ВОЛН С ПОМОЩЬЮ СПИНОВОГО ТОКА

Н. Д. Лобанов<sup>1</sup>, О. В. Матвеев<sup>1</sup>, М. А. Морозова<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Саратовский государственный университет им. Н.Г. Чернышевского

E-mail: [nl\\_17@mail.ru](mailto:nl_17@mail.ru)

В настоящее время проводится большое число исследований в области физики твердого тела, такой рост обусловлен не только развивающимися фундаментальными исследованиями, но и потребностью рынка в реальных прикладных компонентах, поскольку всё сложнее уменьшать размеры классических полупроводниковых устройств. Одной из альтернатив могут быть такие области, как спинтроника [1] и магноника [2]. В спинтронике исследуется передача сигнала с помощью спина заряженных частиц, в отличие от классической электроники, где в основе лежит заряд. Магноника же в свою очередь опирается на теорию о том, что в магнитоупорядоченных материалах происходит прецессия намагниченности и бегут так называемые спиновые волны.

В данной работе исследуется структура, состоящая из магнонных кристаллов с прослойкой из нормального металла. Магнонные кристаллы представляют собой ферромагнитные пленки с периодической модуляцией толщины в виде прямоугольных канавок. Нормальный металл – это металл с большой спин-орбитальной связью. К структуре прикладывается поле таким образом, чтобы в ферромагнитных слоях возбуждались поверхностные магнитостатические волны. К нормальному металлу прикладывается напряжение, чтобы пронаблюдать влияние спинового эффекта Холла [3, 4]. В данном случае спиновый эффект Холла будет приводить к тому, что спины «вверх» будут у одного интерфейса магнонный кристалл/нормальный металл, спины «вниз» у другого, соответственно будет протекать спиновый ток. За счет такого распределения будет наблюдаться ослабление спиновой волны на одном интерфейсе и усиление на другом. Интересно было исследовать влияние спинового тока (задано параметром  $\tau$ ) на запрещенные зоны в такого рода структуре.

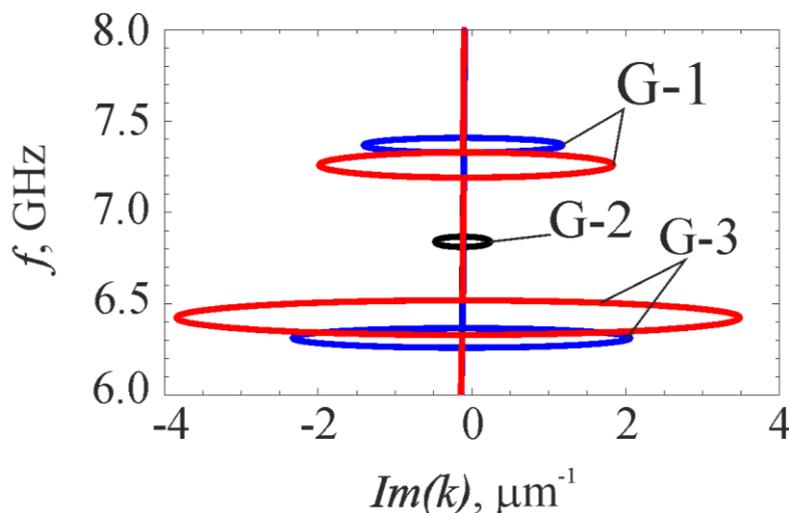


Рис. 1 Зависимость частоты от  $Im(k)$  при  $\tau = 0$  (черные кривые),  $\tau = 0.4$  GHz (синие кривые),  $\tau = 0.5$  GHz (красные кривые).

На Рис. 1 рассмотрена зависимость частоты от мнимого волнового числа в несимметричной структуре со сдвигом на период одного магнетонного кристалла относительно другого при разных значениях параметра спинового тока  $\tau$ . Показано, что можно при введении спинового тока добиться формирования запрещенных зон G-1 и G-3, причем зона G-2 пропадает. Также можно заметить, что полосы непропускания G-1 и G-3 увеличиваются по глубине с увеличением спинового тока, то есть растет затухания в запрещенной зоне. Видно, что запрещенная зона G-1 сдвигается вниз по частотам, а зона G-3 сдвигается вверх по частотам.

Рассматриваемая структура позволяет расширить возможности устройств, основанных только на принципах магноники и дополнить их элементами из спинтроники. Такие устройства могут позволить эффективнее управлять запрещенными зонами и улучшить технологии создания СВЧ-фильтров.

*Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда (грант № 23-29-00759).*

#### Библиографический список

1. Hirohata A. et al. // JMMM. 2020. V. 509. P. 166711.
2. Flebus B. et al. // J. of Phys.: Cond. Mat. 2024.
3. Sinova J. et al. // Reviews of modern physics. 2015. V. 87. №. 4. P. 1213-1260.
4. Wang X. et al. // Physical Review Applied. 2022. V. 18. №. 2. P. 024080.

## ЭКСТРЕМАЛЬНАЯ МУЛЬТИСТАБИЛЬНОСТЬ В ДИССИПАТИВНОМ ОТОБРАЖЕНИИ ПОД УПРАВЛЕНИЕМ ГАМИЛЬТОНОВОЙ СИСТЕМЫ

Д.О. Любченко<sup>1,2</sup>, А.В. Савин<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Саратовский филиал ИРЭ им. В.А. Котельникова РАН.

<sup>2</sup>Саратовский национальный исследовательский государственный университет им. Н.Г. Чернышевского

E-mail: dima4398lub@mail.ru

Мультистабильность представляет собой явление, характеризующееся сосуществованием нескольких аттракторов при неизменных параметрах системы. Существует множество примеров систем, демонстрирующих мультистабильность [1]. Крайне необычным классом систем являются системы с бесконечным числом сосуществующих аттракторов. В ряде работ (например [2-3]) разделяют такого вида мультистабильности на мультистабильность со счетным множеством аттракторов и с несчетным множеством аттракторов. Мультистабильность обычно возникает в системах с бесконечным счетным числом аттракторов, когда есть бесконечное счетное число положений равновесия или когда динамика зависит от начальных условий. В таких случаях при плавном изменении начальных условий могут возникать каскады бифуркаций, которые могут формировать бесконечное несчетное множество аттракторов [3-5].

В работе [6] выделяется определенный класс однонаправленных систем, в составе которых диссипативное отображение однонаправлено связанное с консервативной – гамильтоновой системой. Предложенный класс систем демонстрирует большое число сосуществующих различных режимов: квазипериодические торы, странные нехаотические аттракторы и хаос как с одним, так и двумя положительными показателями Ляпунова. Также в работе [6] показана чувствительность аттракторов, получаемых в подпространстве диссипативной системы, к возмущению в воздействии со стороны гамильтоновой системы.

В данной работе исследуется система, предложенная в [7]:

$$\begin{cases} \alpha_{n+1} = \alpha_n - 2C \sin \varphi_n, \\ \varphi_{n+1} = \varphi_n + A \tan \alpha_{n+1}, \end{cases} \quad (1)$$

$$\begin{cases} \Omega_{n+1} = \Omega_n + 2B \sin \psi_n \cos \alpha_{n+1}, \\ \psi_{n+1} = \psi_n + \frac{1}{\Omega_n \cos \alpha_{n+1} + 2B \sin \psi_n}, \end{cases} \quad (2)$$

где:  $\Omega_{n+1x} = \Omega_n \sin(\alpha_n + 2\gamma) - 2\gamma u$ ,  $\Omega_{n+1y} = \Omega_n \cos(\alpha_n + 2\gamma) - 2u$ ,  $\gamma = -C \sin \varphi_n$ ,  $u = -B \sin \psi_n$ . Данное четырехмерное отображение представимо в виде двух двумерных подсистем: (1) – консервативная система, воздействующая на диссипативную систему (2). Система (1) может демонстрировать как хаос, так и квазипериодические колебания в зависимости от начальных условий. Система (1)-(2) отличается от класса, предложенного в [6], однако в ней также возможно сосуществование большого числа различных аттракторов (рис. 1).

На рис. 2 представлены результаты вычислений старшего показателя Ляпунова подсистемы (2) для различных  $\alpha_0 = 0.05 + 0.05k$ , где  $k=0..21$ . На графике

видны области колебаний старшего показателя, которые плотно заполняют некоторые области на графике, и гладкие области. Колебания старшего показателя указывают на то, что близким траекториям ведущей системы соответствуют принципиально разные аттракторы в ведомой системе. В области плавного изменения старшего показателя Ляпунова аттракторы также разные (т.к. показатель меняется), но близкие друг к другу, что позволяет вычислять расстояния между аттракторами  $d$ . Если выбрать начальные условия  $\alpha_0$  и  $\alpha_0 + \varepsilon$  в области гладкого изменения старшего показателя, более детальный анализ данной области показал, что зависимость  $d$  от  $\varepsilon$  линейная. Это позволяет предположить, что на каждое начальное условие ведомой системы в подпространстве ведущей системы возникает свой аттрактор.

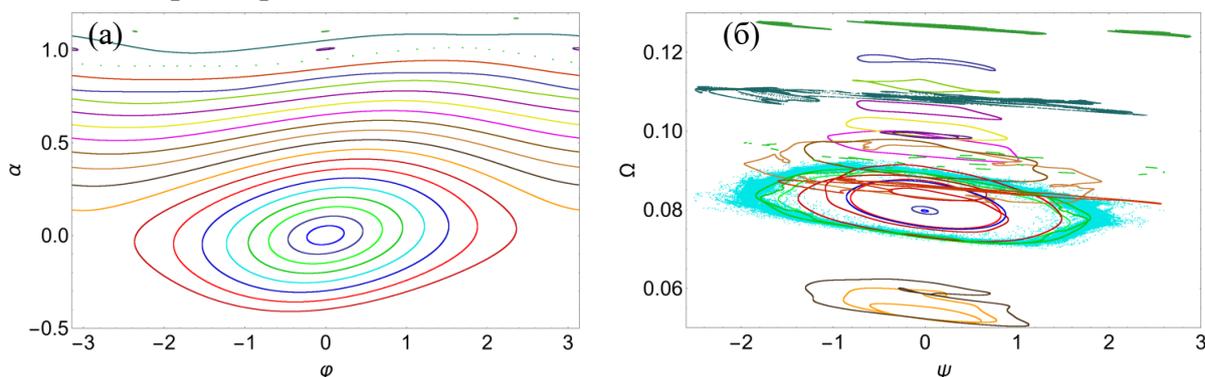


Рис. 1. (а) Инвариантные кривые подсистемы (1); (б) аттракторы в подсистеме (2); при параметрах  $A = 2, B = 0.003, C = 0.05$  и начальных условиях  $\psi_0 = 0, \Omega_0 = 0.1, \varphi_0 = 0.0, \alpha_0 = 0.05 + 0.05k$ , где  $k=0..21$ . Цвета на (а) и (б) соответствуют.

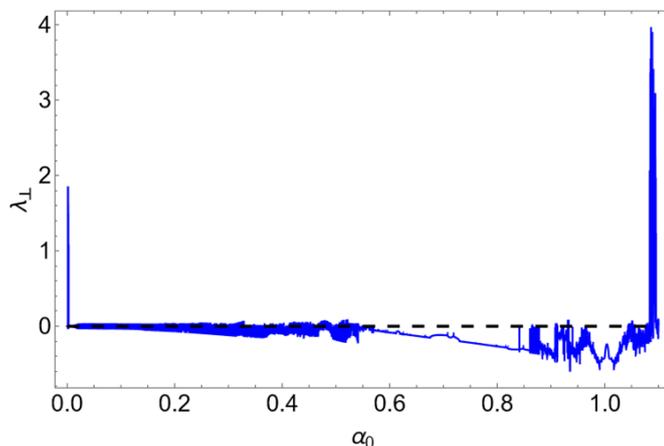


Рис. 2. Зависимость значений старшего показателя Ляпунова подсистемы (2) в зависимости от начального значения  $\alpha_0$  подсистемы (1) при параметрах  $A = 2, B = 0.003, C = 0.05$  и начальных условиях  $\psi_0 = 0, \Omega_0 = 0.1$  и  $\varphi_0 = 0.0$ .

### Библиографический список

1. Fang S., Zhou S. et al. // MSSP. 2022. V. 166. P. 108419.
2. Shen Y., Zhang Y. et al. // IJBC. 2020. V. 30. N. 13. P. 2050183.
3. Ahmadi A., Parthasarathy S. et al. // Chaos. 2023. V. 174. P. 113765.
4. Ramamoorthy R., Jamal S.S. et al. // Complexity. 2021. V. 2021. P. 8068737.
5. Sun J., Li C. et al. // Ieee Access. 2020. V. 8. Pp. 139289–98.
6. Lai Y.-C., Grebogi C. // Phys. Rev. E. 1996. V. 54. P. 4667.
7. Lyubchenko D.O., Savin A.V. // International Conference MMST 2022. Pp. 160-166.

## ОПТИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА- КОМПОЗИТНЫХ МЕМБРАН НАНОПОРИСТОГО АНОДНОГО ОКСИДА АЛЮМИНИЯ

Д.А. Мальцев<sup>1</sup>, И.Н. Михайлов<sup>2,3</sup>, Ю.В. Никулин<sup>2</sup>, М.Ю. Васильков<sup>1,2</sup>,  
С.С. Волчков<sup>1</sup>, Н.М. Ушаков<sup>1,2</sup>

*1Саратовский филиал ИРЭ им. В.А. Котельникова РАН.*

*2Саратовский национальный исследовательский государственный университет  
им. Н.Г. Чернышевского*

*3 Саратовский государственный технический университет им. Гагарина Ю.А.  
E-mail: mal-log@mail.ru*

Нанопористый анодный оксид алюминия (НПАОА) представляет большой интерес для нанотехнологий из-за его рентабельных и легко расширяемых технологий производства [1], а также из-за его широкой области применения [2,3]. Фотонные свойства НПАОА делают этот материал особенно интересным для оптических приложений [4]. Отдельное внимание различных авторов уделяется созданию композитных мембран НПАОА в которых проявляются изменения оптических свойств мембран НПАОА [5] Известны работы, в которых авторы описывали существование фотонных стоп-зон для света, распространяющегося внутри материала в направлении, перпендикулярном осям пор [6], а также описан метод получения распределенных брэгговских отражателей (РБО) на основе НПАОА в направлении, перпендикулярном поверхности (вдоль осей пор) [7]. РБО представляют собой диэлектрические структуры с периодическим изменением показателя преломления. При этом периодические структуры в виде дифракционных решеток могут представлять собой поверхностные периодические структуры (поры постоянного диаметра) или внутривидовые периодические структуры (поры с периодическим изменением диаметра). Это приводит к возникновению фотонных стоп-зон (полос) для света

В данной работе приведены результаты исследования взаимодействия оптического излучения с периодическими поверхностными наноструктурами мембраны пористого анодного оксида алюминия, представлены спектры брэгговского отражения при различных углах падения света на поверхность мембраны, отмечены особенности брэгговского отражения в направлении перпендикулярном осям пор, а также выявлена более выгодная методика заполнения пор.

Рассматриваются угловые характеристики для образцов с модификацией мембран оксидом цинка, нанесённым методом магнетронного напыления (рис.1) и золь-гель методом (рис.2).

В данной работе видно, что модификация оксидом цинка приводит к увеличению отражающей способности пористых структур.

В работе показано, что модификация выполненная золь-гель методом обеспечивает результаты близкие к модификации выполненной методом магнетронного напыления.

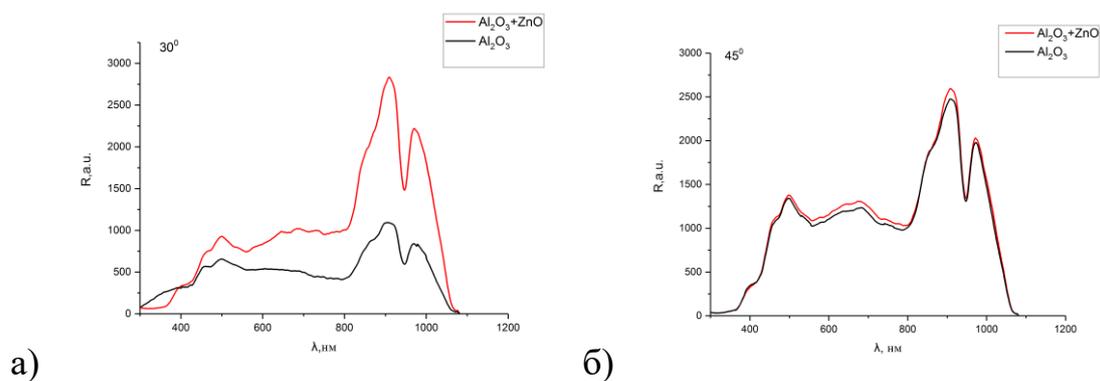


Рис 1. Спектральные зависимости оптического отражения для нанокompозита ZnO/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> для разных углов а) 30°, б) 45°

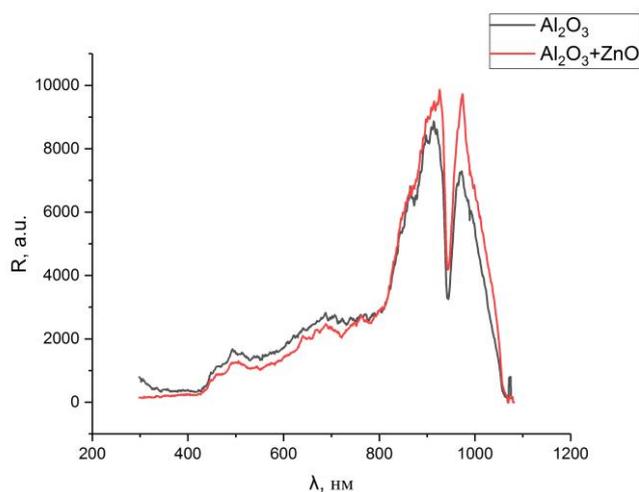


Рис 2 – Спектральные зависимости оптического отражения для нанокompозита ZnO/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>

*Работа выполнена в рамках государственного задания «Сенсор-2».*

### Библиографический список

1. Lee W. // JOM. 2010. V.62. P. 57–63.
2. Santos A, Kumeria T, Losic D. // TrAC Trends Anal Chem. 2013. V.44. P. 25.
3. Pallarès J, Marsal LF, Ferré-Borrull J, Santos A, Formentin P. // Mater Lett. 2010. V.64. P. 371.
4. Kumeria T, Rahman MM, Santos A, Ferré-Borrull J, Marsal LF, Losic D. // Anal Chem. 2014. V.86. P. 18375.
5. Huong Nguyen Que Tran, Nhi Dang Ai Le, Quan Ngoc Le, Cheryl Suwen Law, Siew Yee Lim, Andrew D. Abell and Abel Santos. *Spectral Engineering of Tamm Plasmon Resonances in Dielectric Nanoporous Photonic Crystal Sensors* // ACS Appl. Mater. Interfaces 2022. V. 14 (20). P. 22747–22761.
6. Maksymov I, Ferré-Borrull J, Pallarès J, Marsal LF. // Photonics Nanostructures - Fundam Appl. 2012. V.10. P. 459–462.
7. Rahman MM, Marsal LF, Pallarès J, Ferré-Borrull J. // ACS Appl Mater Interfaces. 2013. V.5. P. 13375–13381.

## ИССЛЕДОВАНИЕ РЕЖИМОВ РАСПРОСТРАНЕНИЯ СПИНОВОЙ ВОЛНЫ В ЛАТЕРАЛЬНО СВЯЗАННЫХ ВОЛНОВОДАХ С ОРТОГОНАЛЬНЫМ ЭЛЕМЕНТОМ.

Маслий Р.В.<sup>1\*</sup>, Садовников А.В.<sup>1</sup>

<sup>1</sup>*Saratov State University*

\*[romamaslij5@gmail.com](mailto:romamaslij5@gmail.com)

В этой статье мы исследуем влияние величины дипольного взаимодействия, регулируемой лазером, на реализацию передачи спиново-волнового сигнала в боковом и вертикальном направлениях в системе ортогональных микроволноводов. В статье показана возможность создания делителя сигнала и логического элемента с управляемой задержкой выходного сигнала.

Передача магнитного момента или спина электрона вместо переноса заряда открывает новые возможности для использования спин-волновых квантов - магнонов - для разработки методов и подходов к обработке, передаче и хранению сигналов, закодированных как амплитуда и фаза спиновых волн (СВ) в микроволновом и терагерцовом диапазоне. В то же время длины возбуждаемых ПО колеблются от сотен микрон до десятков нанометров и могут изменяться под влиянием различных факторов: величины и направления поля намагничивания, путем изменения типа и величины анизотропии магнитного материала, путем облучения поверхности магнитных пленок с помощью сфокусированного лазерного излучения.

В данной работе были исследованы режимы распространения спиновых волн в массивах микроволноводов, образованных двумя слоями гигаометров. Исследованы механизмы, приводящие к образованию различных "узоров", формируемых спин-волновым сигналом при его распространении в системе продольно-нерегулярных тонкопленочных магнитных микроволн, расположенных в каждом слое структуры.

Микромагнитное моделирование [1] было проведено для системы поперечно и вертикально связанных ферритовых микроволн (рис. 1) [2-3] из пленки железо-иттриевого граната, расположенной на подложке из галлий-гадолиниевого граната (GGG). СВЧ-направляющие выполнены в виде удлиненных полос длиной  $L = 6$  мм, шириной  $b = 300$  мкм и толщиной  $c = 10$  мкм, образующих конструкцию, состоящую из двух волноводов, расположенных с зазорами в горизонтальной плоскости, и одного волновода, расположенного перпендикулярно над ними. Намагниченность насыщения муляжа составляла 139 Гс, а величина внешнего магнитного поля, направленного вдоль оси  $y$ , составляла 1200 Э. Численное исследование проводилось на частоте 5,2 ГГц. Такая конфигурация намагничивания обеспечивает эффективное возбуждение поверхностных спиновых волн. Связанные ферритовые структуры расширяют функциональные возможности микроволновых устройств за счет дополнительного управляющего параметра - связи между микроволновыми волнами, распространяющимися в отдельных ферромагнитных пленках.

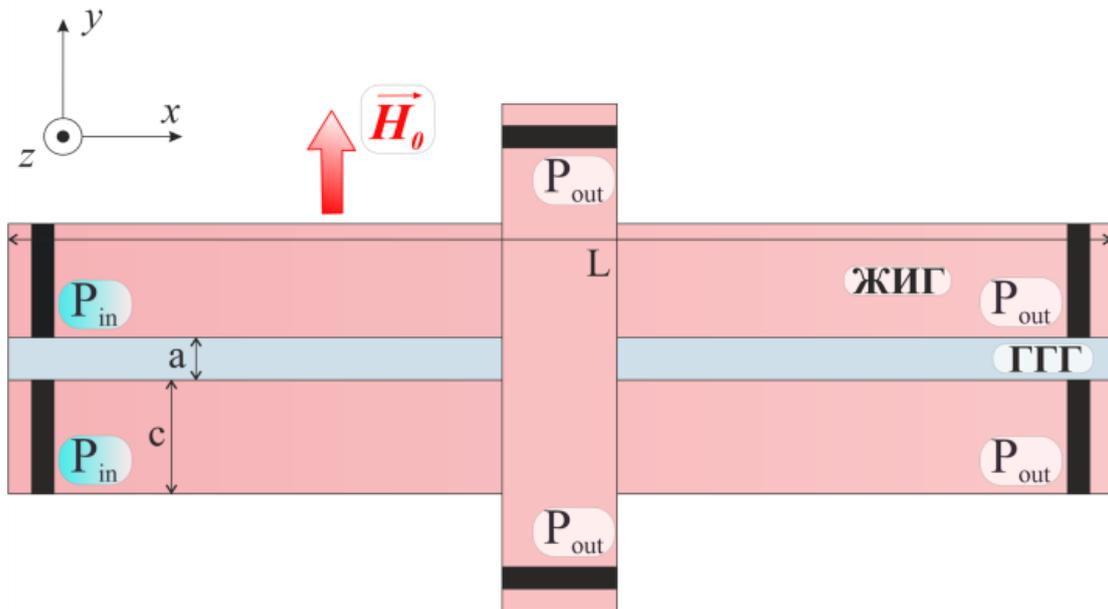


Рис. 1. Схематическое изображение решетки СВЧ-направляющих. На рисунке представлены следующие обозначения:  $a$  – горизонтальный зазор;  $c$  – ширина;  $L$  – длина СВЧ-диодов;  $P_{in}$  и  $P_{out}$  – микрополосковые антенны для возбуждения и приема СВЧ-излучения соответственно.

В ходе работы было проведено исследование по двойному контролю характеристик СВ в решетке при одновременной реализации бокового и вертикального типов связи.

Проведено исследование особенностей процессов формирования пучков спиновых волн для структуры связанных магнитных волноводов.

Выявлены особенности распространения и механизмы изменения пространственного распределения профиля пучка спиновых волн при совместном проявлении эффектов анизотропного распространения сигнала, дипольной связи и нелинейной зависимости параметров среды от мощности.

*Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда в рамках выполнения проекта №20-79-10191.*

#### Библиографический список

1. G. Gubbiotti et al., // Phys. Rev. Appl. 2021. Vol. 15. P. 014061.
2. A.K. Ganguly et al., // J. Appl. Phys. 1974. Vol. 45. P. 4665.
3. H. Puzkarski. // Surf. S. Rep. 1994. Vol. 20. P. 45.
4. A.V. Sadovnikov et al. // Appl. Phys. Lett. 2015. Vol. 107. P. 202405.

## УМЕНЬШЕНИЕ ЗАТУХАНИЯ ПОВЕРХНОСТНОЙ ВОЛНЫ В ГРАФЕНЕ ЗА СЧЕТ ПОСТОЯННОГО ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ТОКА.

И. М. Моисеенко<sup>1</sup>, Д. В. Фатеев<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup> Саратовский филиал Института радиотехники и электроники  
им. В.А. Котельникова РАН

<sup>2</sup> Саратовский государственный университет им. Н.Г. Чернышевского  
E-mail: MoiseenkoIM@yandex.ru

Исследования по созданию усилителей, источников и детекторов терагерцового (ТГц) излучения на основе графена стали активно разрабатываемыми направлениями современной фотоники [1-3]. Помимо графеновых структур с инверсной населенностью носителей заряда, интересных для создания ТГц-усилителей и источников, перспективными являются структуры на основе графена с постоянным электрическим током. Возможность усиления ТГц излучения за счет черенковской эмиссии плазмонов дрейфующими электронами в графене в гидродинамическом режиме была показана в работе [4]. Постоянный электрический ток, направленный перпендикулярно направлению распространения волны в графене приводит к емкостной проводимости графена и возможности существования в нем усиливающихся поверхностных поперечно-электрических (ТЕ) волн [5, 6].

В данной работе изучается дисперсия и затухание поверхностной плазменной волны в графене с постоянным током, направленным произвольно относительно волнового вектора волны. В исследуемой структуре монослой графена окружен полубесконечными диэлектриками с диэлектрическими проницаемостями  $\varepsilon_{1,2}$ . Лист графена описывается нелокальной проводимостью, полученной в рамках гидродинамического приближения. Наличие дрейфа носителей заряда под углом к направлению распространения плазмонов приводит к тензорному виду проводимости графена, таким образом поверхностная волна имеет смешанную ТМ+ТЕ поляризацию. Дисперсионное уравнение для таких волн в случае произвольно направления тока в графене содержит в себе все элементы тензора гидродинамической проводимости графена ( $\sigma_{ij}$ , где  $i, j = x, z$ ) и может быть записано в следующем виде:

$$\omega \varepsilon_0 \left( \frac{\varepsilon_1}{k_{y1}} - \frac{\varepsilon_2}{k_{y2}} \right) + \sigma_{xx} + \frac{\sigma_{xz} \sigma_{zx} \mu_0 \omega}{k_{y2} - k_{y1} - \sigma_{zz} \mu_0 \omega} = 0, \quad (1)$$

где  $k_{y1,2} = \pm \sqrt{\omega^2 \varepsilon_{1,2}/c^2 - k_x^2}$  – поперечное волновое число,  $\omega$  – круговая частота,  $c$  – скорость света,  $k_x$  – продольное волновое число,  $\varepsilon_0$  и  $\mu_0$  – электрическая и магнитная постоянные, соответственно. Затухающая поверхностная волна существует при любом направлении электронного дрейфа (в отличие от усиливающейся плазмонной моды [7]), дисперсия этой моды показана на рис. 1(а). Затухание такой моды уменьшается с увеличением угла между направлениями дрейфа носителей и волновым вектором ТМ+ТЕ волны (рис. 1(б)). Уменьшение затухания при косом дрейфе обусловлено уменьшением составляющей скорости дрейфа  $V_{x0}$  (при увеличении  $V_{z0}$ ). В случае дрейфа носителей, перпендикулярного волновому вектору, затухание уменьшается приблизительно в 2 раза по сравнению с затуханием плазмонов в случае коллинеарного дрейфа и направления распространения плазмона.

*Работа выполнена при поддержке РНФ, грант № 22-19-00611.*

### Библиографический список

1. A. N. Grigorenko, M. Polini, and K. S. Novoselov // Nature Photonics. 2012. Vol. 6. P. 749.
2. F. H. L. Koppens, T. Mueller, P. Avouris, A. C. Ferrari, M. S. Vitiello and M. Polini // Nature Nanotech. 2014. Vol.9. P. 780.
3. R. A. Lewis // J. Phys. D: Appl. Phys. 2014. Vol. 47. P. 374001.
4. D. Svintsov // Phys. Rev. B. 2019. Vol. 100. P. 195428.
5. I. M. Moiseenko, V. V. Popov, D. V. Fateev // J. Phys.: Condens. Matter. 2022. Vol. 34. P. 295301.
6. I. M. Moiseenko, V. V. Popov, D. V. Fateev // J. Phys.: Condens. Matter. 2023. Vol. 35. P. 255301.
7. I. M. Moiseenko, D. V. Fateev, and V. V. Popov // Phys. Rev. B. 2024. Vol. 109. P. L041401.

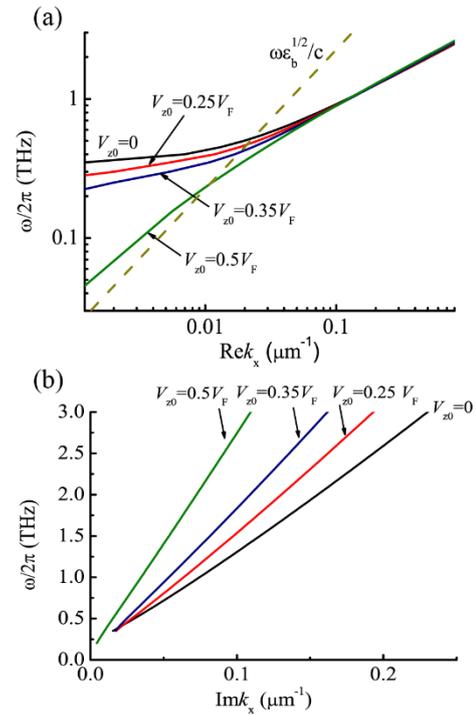


Рис. 1. (а) Действительная и (б) мнимая части продольного волнового числа поверхностной ТМ+ТЕ волны в графене в случае произвольно направленного дрейфа носителей заряда относительно направления распространения этой волны. Параметры графена: энергия Ферми 200 мЭв,  $\tau = 0.5$  пс, скорость дрейфа электронов, сонаправленная с волновым вектором  $V_{x0} = \sqrt{V_0^2 - V_{z0}^2}$ , где  $V_0 = 0.5V_F$ , где  $V_F$  – скорость Ферми в графене.

## АНАЛИЗ ВЛИЯНИЯ ВИХРЕВЫХ СТРУКТУР НА ДВИЖЕНИЕ ТЕЛА С ОСТРОЙ КРОМКОЙ

Л.Н. Мокрушина, Е.В. Ветчанин

Удмуртский государственный университет

E-mail: [lmokrush@mail.ru](mailto:lmokrush@mail.ru)

Для описания движения тел, подобных рыбоподобному водному роботу, представленному в работе [1], используются модели на основе совместного решения уравнений движения твердого тела с уравнениями Навье-Стокса, а также модели меньшей размерности, которые представляют собой системы обыкновенных дифференциальных и интегро-дифференциальных уравнений, а также уравнений с запаздывающим аргументом.

Для простоты вместо исходного профиля из работы [1] рассмотрим профиль Жуковского, заданного конформным отображением вида

$$z = ka + \frac{k}{2} \left( \zeta + \frac{a^2}{\zeta} \right), \quad a > 0, \quad (1)$$

а также будем считать, что движение плоскопараллельное. При таком движении можно составить комплексный потенциал, который в общем виде имеет вид

$$W(\zeta) = u_1 W_1(\zeta) + u_2 W_2(\zeta) + \omega W_3(\zeta) + \frac{\Gamma_0}{2\pi i} \ln(\zeta - \zeta_0), \quad (2)$$

где  $u_1$ ,  $u_2$ ,  $\omega$  — поступательные и вращательная скорости соответственно, а циркуляция  $\Gamma_0$  определяется из условия Кутты-Чаплыгина и в общем случае является функцией времени. При ненулевой производной циркуляции по времени при вычислении давления из интеграла Коши-Лагранжа возникает особенность, связанная с тем, что аргумент комплексного числа является многозначной функцией. Следовательно, давление на границе профиля ведет себя неоднозначно, то есть имеет разрыв. Значит, такая модель должна быть скорректирована.

Для корректировки в классической литературе [2] предлагается учитывать образование вихревой пелены, где касательная составляющая скорости терпит разрыв, но при этом давление является непрерывной функцией. Такой подход предполагает решение сингулярного интегро-дифференциального уравнения — уравнения Биркгофа-Ротта [3]:

$$\overline{\frac{dz(\Gamma')}{dt}} = \frac{1}{2\pi i} \text{p.v.} \int \frac{d\Gamma}{z(\Gamma') - z(\Gamma)}. \quad (3)$$

Интеграл в правой части (3) вычисляется в смысле главного значения.

Решение уравнения (3) является достаточно трудоемкой вычислительной задачей. Ее можно еще упростить, заменяя непрерывное распределение вихрей дискретным [4].

Для модели с точечным сходом вихрей можно записать аналогичный (2) комплексный потенциал, учитывающий образование вихрей. Для рассматриваемой системы он имеет следующий вид

$$W = \frac{k}{2} \left( \frac{a^2 \bar{u}}{\zeta} - \frac{R^2 u}{\zeta - \zeta_0} \right) + \frac{ik^2 \omega}{4\zeta_0} \left( \frac{a^2 (\sigma \zeta_0 - a)^2}{\sigma \zeta} - \frac{R^2 (a + \zeta_0)^2}{\zeta - \zeta_0} \right) + \frac{\Gamma}{2\pi i} \ln(\zeta - \zeta_0) + \sum_{j=1}^N \frac{\Gamma_j}{2\pi i} (\ln(\zeta - \zeta_j) - \ln(\zeta - \zeta_j^*)), \quad (4)$$

где вихри добавляются согласно теореме Милна-Томсона [5].

Зная комплексный потенциал, можно вычислить силы и момент сил по формулам Седова [2]

$$F_1 + iF_2 = -(\lambda_1 \dot{u}_1 - \lambda_{13} \dot{\omega}) - i(\lambda_2 \dot{u}_2 + \lambda_{23} \dot{\omega}) + (\lambda_2 u_2 + \lambda_{23} \omega) \omega - i(\lambda_1 u_1 - \lambda_{13} \omega) \omega + f_1 + if_2, \quad (5)$$

$$G = \lambda_{13} \dot{u}_1 - \lambda_{23} \dot{u}_2 - \lambda_3 \dot{\omega} + (\lambda_1 u_1 - \lambda_{13} \omega) u_2 - (\lambda_2 u_2 + \lambda_{23} \omega) u_1 + g, \quad (6)$$

где  $f_1, f_2, g$  — функции, зависящие от координат вихрей, их скоростей и поступательной и вращательной скорости твердого тела.

На основе полученных сил и момента можно составить уравнения совместного движения профиля и вихрей. Для удобства уравнения составляются таким образом, что расчет движения точечных вихрей ведется в  $\zeta$ -плоскости, где профиль Жуковского считается неподвижным кругом, и переводится в  $z$ -плоскость отображением (1).

При численном моделировании движения тела в жидкости через промежуток  $\Delta t = 0.2$  добавлялся новый точечный вихрь с координатами  $-a + 0.7(\zeta_{\text{end}} + a)$ , где  $\zeta_{\text{end}}$  — координата последнего вихря и интенсивностью, вычисляемой из условия Кутты-Чаплыгина. Результаты моделирования приведены на рис. 1.

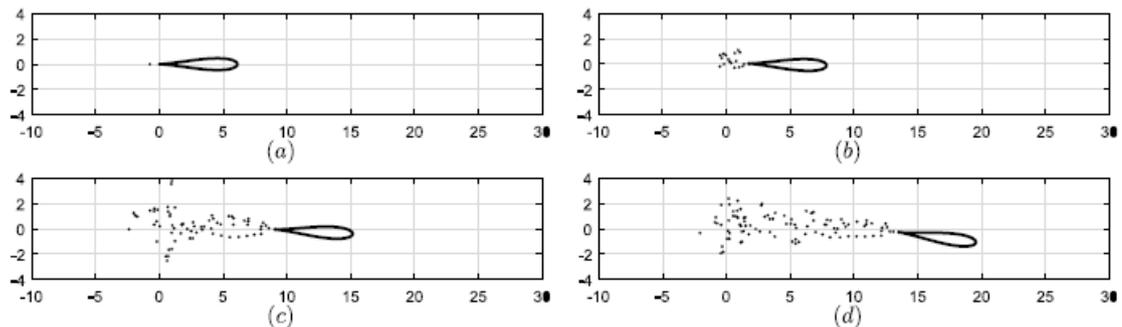


Рис. 1. Результаты моделирования для симметричного профиля с параметрами:  $a = 1.5, k = 2, \zeta_0 = 0.2, K(t) = \varepsilon \sin \Omega t, \varepsilon = 20, \Omega = 2\pi, x_1 = x_2 = \theta = P_1 = P_2 = M = 0$ .

*Исследование выполнено в рамках выполнения государственного задания Минобрнауки России (FEWS-2024-0007).*

#### Библиографический список

1. Tallapragada, P., A Swimming Robot with an Internal Rotor As a Nonholonomic System // Proc. of the American Control Conf. (ACC, Chicago, Ill., Jul 2015), pp. 657–662

2. *Седов Л.И., Плоские задачи гидродинамики и аэродинамики* // Москва: Государственное издательство технико-теоретической литературы. 1950.
3. *Saffman P. G. Vortex dynamics* // Cambridge university press. 1995.
4. *Mason, R.~J., Fluid Locomotion and Trajectory Planning for Shape-Changing Robots* // PhD Dissertation, California Institute of Technology, Pasadena, Calif., USA, 2003, 264 pp.
5. *Milne-Thomson L. M. Theoretical hydrodynamics* // Courier Corporation, 2013.

## **ВЛИЯНИЕ ТЕПЛОВЫХ РЕЖИМОВ НА ФУНКЦИОНИРОВАНИЕ ЭЛЕКТРОННО-ОПТИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ ЛБВ С РАДИАЦИОННЫМ ОХЛАЖДЕНИЕМ В ДИНАМИЧЕСКОМ РЕЖИМЕ РАБОТЫ**

**Е.С. Молякова<sup>1</sup>, Д.Л. Шалашова<sup>1,2</sup>, М.В. Рахматулин<sup>1,2</sup>, И.О. Чигуров<sup>1</sup>**

<sup>1</sup>Акционерное общество «Научно-производственное предприятие «Алмаз».

<sup>2</sup>Саратовский государственный технический университет им. Гагарина Ю. А.

E-mail: [molykova@yandex.ru](mailto:molykova@yandex.ru)

В настоящее время лампы бегущей волны (ЛБВ) находят широкое применение в различных областях науки и техники. Необходимость повышения коэффициента полезного действия (КПД) ЛБВ обусловлена не только ограниченной мощностью источников питания, но и возрастающими требованиями к предельно допустимому уровню тепловыделения изделий. Особенно это важно для изделий космического применения, так как существует лишь один способ охлаждения спутника – излучение тепла в окружающее пространство [1].

ЛБВ должны сохранять работоспособность при пониженной и повышенной температурах среды. Для изделий космического применения за температуру окружающей среды принимается температура плиты охлаждения, на которую установлена ЛБВ.

Одним из основных функциональных узлов ЛБВ является магнитная периодическая фокусирующая система (МПФС) [2,3]. В связи с тем, что тепловые воздействия на постоянные магниты могут приводить как к обратимым, так и необратимым изменениям амплитуды магнитного поля, при разработке электронно-оптической системы (ЭОС) ЛБВ необходимо учитывать изменения магнитного поля при воздействии предельно допустимых повышенной и пониженной температуры окружающей среды, и воздействие этих изменений на траекторию электронного потока.

Целью настоящей работы является определение влияния тепловых режимов на функционирование ЭОС ЛБВ космического применения с радиационным охлаждением в динамическом режиме работы (с подачей входной мощности) в нормальных климатических условиях, а также при пониженной и повышенной температуре окружающей среды.

В программе SolidWorks Flow Simulation [4] был проведен расчет теплового режима ЛБВ с радиационным охлаждением в динамическом режиме, при различных начальных условиях. Минимальная температура среды при эксплуатации, исследуемой ЛБВ, равна  $-15\text{ }^{\circ}\text{C}$ , максимальная повышенная температура окружающей среды при эксплуатации равна  $65\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Указанные выше температуры задаются как температура посадочной поверхности ЛБВ. При этом, при расчете распределения тепла в ЛБВ при повышенной температуре среды учитывается дополнительная тепловая нагрузка на радиатор коллектора равная  $19,32\text{ Вт}$ , при освещении его Солнцем вертикально сверху вниз. При расчете распределения тепла в ЛБВ при пониженной температуре среды дополнительная тепловая нагрузка на радиатор не задается.

На рисунке 1 представлена трехмерная модель исследуемой ЛБВ, построенная в программе SolidWorks.

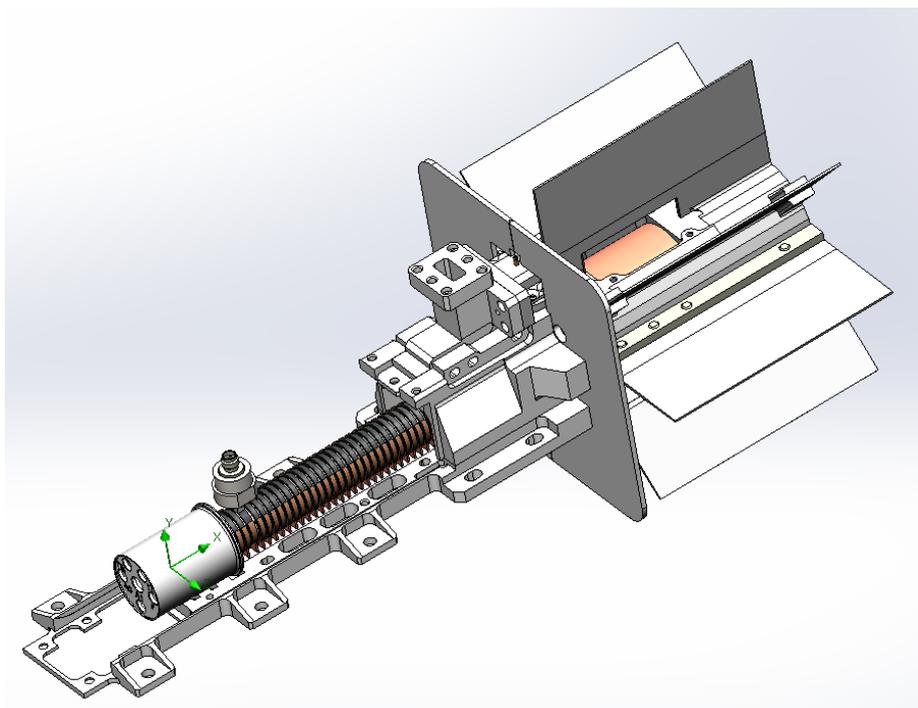


Рис. 1. 3D-модель исследуемой ЛБВ, построенная в программе SolidWorks.

Для более точного вычисления теплового режима учитывалось распределение электронов по внутренним поверхностям коллектора, полученные в результате траекторного анализа. Степень черноты радиатора и теплового экрана принимается равным  $\varepsilon = 0,8$ . Коэффициент поглощения солнечного излучения у радиатора и теплового экрана  $AS = 0,5$ .

Используя данные полученные в результате тепловых расчетов ЛБВ в различных режимах работы, при различных климатических условиях, был проведен расчет изменения амплитуд магнитной индукции МПФС. При расчете использовалось значение температурного коэффициента обратимых изменений магнитной индукции  $TK_{\text{в}} = 0,04\%/^{\circ}\text{C}$ , соответствующее используемой марке материала, из которого изготовлена МПФС.

Результаты расчета электронной оптики с учетом изменения амплитуды магнитной индукции МПФС под действием температуры показали, что температура окружающей среды оказывает существенное влияние на функционирование МПФС, а, следовательно, и на уровень токопрохождения. Так, наиболее неблагоприятной для функционирования МПФС исследуемой ЛБВ оказалась работа при повышенной температуре среды, что приводит к нежелательному росту тока замедляющей системы. Это вызвано тем, что с повышением температуры падает амплитуда магнитной индукции, величина которой становится недостаточной, в следствие чего значительно возрастают пульсации электронного потока.

#### Библиографический список

1. Чигуров И.О., Калмыков А.С., Царев В.А. Исследование возможности улучшения массогабаритных параметров радиатора коллектора ЛБВ с радиационным охлаждением // 65 лет деятельности на рынке СВЧ-электроники: итоги и современные тенденции. Материалы юбилейной науч.-техн. Конф. АО «НПП «Алмаз». Саратов: Сарат. гос. техн. ун-т, 2022. С. 173-178.

2. *Гилмор, А. С.-мл.* Лампы с бегущей волной / А.С. Гилмор-мл. : пер. с англ. А.Г. Кудряшова; науч. ред. д.э.н., проф., к.ф.-м.н. Н.А. Бушуева. - М.: Техносфера, 2013. - 616 с.
3. *Царев В.А.* Магнитные фокусирующие системы электровакуумных микроволновых приборов О-типа: учеб. пособие / В.А. Царев, Р.В. Спиридонов. – Саратов: Новый ветер, 2010. – 352 с.
4. SOLIDWORKS Flow Simulation | SOLIDWORKS // SOLIDWORKS URL: <https://www.solidworks.com/ru/product/solidworks-flow-simulation> (дата обращения: 10.08.2024).

## ЭФФЕКТЫ МЕЖВОЛНОВОДНОЙ СВЯЗИ В СИСТЕМЕ ОРТОГОНАЛЬНЫХ ЖИГ МИКРОВОЛНОВОДОВ С РЕЗОНАТОРОМ

**В.А. Мошков, А.А. Грачев, А.В. Садовников**

*Саратовский национальный исследовательский государственный университет  
им. Н.Г. Чернышевского*

*E-mail: [moshkovva2003@gmail.com](mailto:moshkovva2003@gmail.com)*

В последнее время исследования ферромагнитных структур, особенно на микро- и наноуровне, стали занимать одну из ключевых позиций для развития современных технологий микро- и наноэлектроники. Возникла новая область микроэлектроники — спинтроника, благодаря важным научным результатам, имеющим потенциал для создания элементной базы на новых физических принципах. В настоящее время спинтроника является активно развивающейся областью электроники, в которой, в частности, изучаются процессы переноса магнитного момента или спина электрическим током в структурах, содержащих магнитные материалы. Перенос магнитного момента может осуществляться также с помощью магнонов или спиновых волн в магнитных металлах и диэлектриках. В связи с этим, возникло такое научное направление, как магноника — область спинтроники, изучающая физические свойства спиновых волн в магнитных микро- и наноструктурах [1-4].

В настоящей работе предлагается исследовать эффекты, возникающие при распространении спиновых волн в структуре из трёх микроволноводов с зазором между ними, причем в зазор помещается прямоугольный резонатор. А также выяснить влияние зазора на прохождение спиновой волны. В данной работе представлены результаты исследования структуры из железо-иттриевого граната (YIG) на подложке из галлий-гадолиниевого граната (GGG). Выбор материала обосновывается тем, что ЖИГ демонстрирует рекордно низкое затухание спиновой волны. На рисунке 1 представлено схематическое изображение структуры из трёх волноводов со следующими параметрами, ширина всех элементов структуры составляет  $a = 500$  мкм, длина центрального ЖИГ-резонатора  $b = 500$  мкм, длина боковых микроволноводов составляет  $c = 2750$  мкм, а толщина  $d = 10$  мкм, общая длина структуры составляет 6000 мкм. Величина зазора  $g$  (обозначен  $G_{ap}$  на рис.1) в ходе исследования составляла 0, 15, 30 мкм. Величина внешнего магнитного поля составляет  $H = 1200$  Э, для эффективного возбуждения поверхностных магнитостатических спиновых волн (ПМСВ) внешнее магнитное поле было направлено вдоль оси  $Oy$ . Входная и выходная микрополосковые антенны расположены на противоположных концах микроволновода. Кроме того, при моделировании были добавлены поглощающие слои, отмеченные « $rml$ » на рис.1, для того, чтобы избежать отражения спиновой волны от краев микроволновода, которые могут негативно повлиять на возбуждение и считывание сигнала с помощью микрополосковых антенн  $p\_in$ ,  $p\_out1$  и  $p\_out2$ .

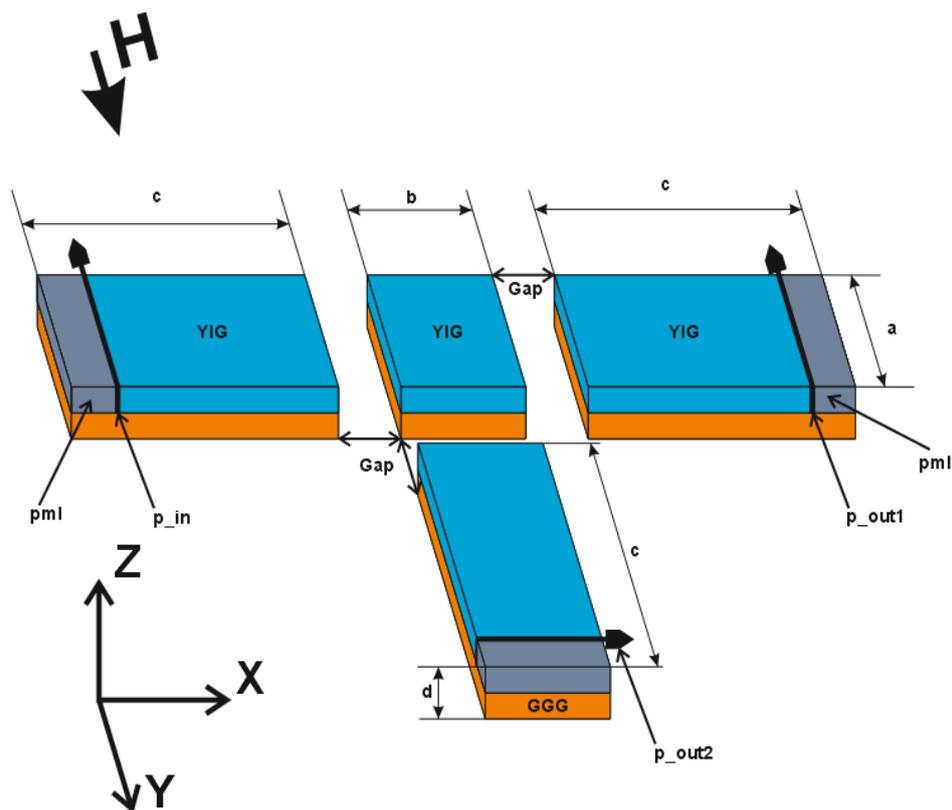


Рис. 1. Схематическое изображение исследуемой структуры

Численное моделирование проводилось в программе `mitax3` [5]. Этот программный пакет, основанный на методе конечных разностей, используется для решения временных и пространственных задач, связанных с распространением спиновой волны в структурах. Для этого структура разбивается на сетку, в каждом узле которой решается уравнение Ландау-Лившица-Гилберта. В результате численного моделирования были получены амплитудно-частотные характеристики (АЧХ) спиновой волны. Для получения АЧХ спиновых волн сигнал подавался на структуру на входную антенну и фиксировались значения амплитуд намагниченности в выходной антенне. Обработка результатов микромагнитного моделирования проводилась в программе `MATLAB`. С помощью двумерного преобразования Фурье строились амплитудно-частотные характеристики для различных параметров системы.

На рис. 2 показаны АЧХ для структуры, продемонстрированной на рис. 1 в диапазоне частот 4.9-5.9 ГГц. Синей линией (на всех графиках она изображена выше) на всех графиках показаны результаты АЧХ, полученные с выходной антенны  $p_{out1}$ , для зазоров  $Gap$  в 0, 15 и 30 мкм соответственно. Красной линией

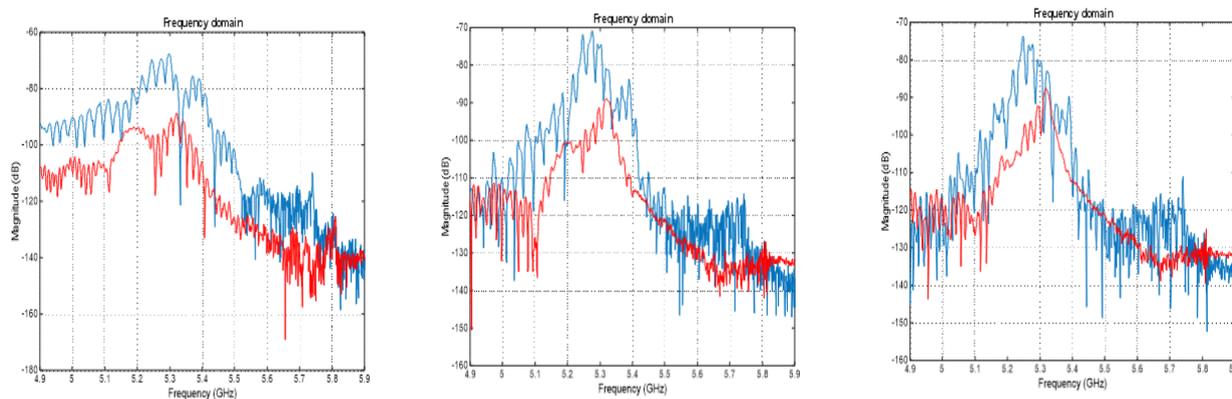


Рис. 2. Слева – АЧХ при  $Gap = 0$  мкм, по центру АЧХ при  $Gap = 15$  мкм, справа АЧХ при  $Gap = 30$  мкм. Синим – данные с антенны  $p\_out1$ , красным – с антенны  $p\_out2$ .

АЧХ с выходной антенны  $p\_out2$ . На левом графике видно при зазоре  $Gap = 0$ , что величина амплитуды на разных выходных антеннах практически не совпадают и имеют общие значения амплитуды лишь после 5.8 ГГц. В последующих графиках с величиной зазора  $Gap = 15$  и 30 мкм можно заметить следующую тенденцию: на частоте  $\sim 5.35$  ГГц и далее величина амплитуды с обеих выходных антенн начинает всё более совпадать между собой с увеличением зазора.

Таким образом, в данной работе рассмотрена структура волновода с ответвлением на основе плёнки ЖИГ. Было проведено численное моделирование, в результате которого показан диапазон частот, в котором возбуждаются ПМСВ. Учитывая изложенные данные, можно сделать вывод, что в подобной структуре Т-образного волновода с увеличением расстояния зазора  $Gap$  возникает эффект, компенсирующий положение выходных антенн и разветвленность структуры. Наличие подобного поведения волны в магнетонном кристалле открывают широкие возможности использования магнетонных кристаллов в СВЧ-устройствах для функциональной обработки сигналов на спиновых волнах, в том числе в СВЧ-фильтрах, для инверсии частоты, буферизации данных и т. д. [6].

*Работа выполнена в рамках выполнения проекта РНФ 20-79-10191.*

### Библиографический список

1. B. Lenk, H. Ulrichs, F. Garbs, M. Münzenberg // Physics Reports. 2011. V. 4. Pp.107-136.
2. A. V. Chumak, V. I. Vasyuchka, A. A. Serga, B. Hillebrands // Nature Physics. 2015. V. 11. P. 453.
3. Vogt K., Fradin F. Y., Pearson J. E., T. Sebastian, Bader S. D., Hillebrands B., Hoffmann A., and Schultheiss H. // Nature communications. 2014. V5(1), Pp.1–5
4. A. A. Grachev, S. E. Sheshukova, A. V. Sadovnikov // Appl. Phys. Lett. 2024. V. 124, P. 162406.
5. Vansteenkiste A., Van de Wiele B. *MuMax*: Journal of Magnetism and Magnetic Materials // 2011. V. 323.
6. S.A. Odintsov, S.E. Sheshukova, S.A. Nikitov, F.Y. Ogrin, A.V. Sadovnikov // Appl. Phys. Lett. 2024. V. 124 (11). P. 112408.
7. Chumak A V, Serga A A, Hillebrands B J. Magnonic crystals for data processing // Journal of Physics D: Applied Physics. 2017. V. 50. P.244001.

## РАЗРАБОТКА ЭЛЕКТРОДИНАМИЧЕСКИХ СТРУКТУР ДЛЯ ВАКУУМНОЙ ЭЛЕКТРОНИКИ СУБ-ТГц ДИАПАЗОНА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ DLP 3D-ПЕЧАТИ И МАГНЕТРОННОГО РАСПЫЛЕНИЯ

И.С. Ожогин<sup>1,2</sup>, Н.М. Рыскин<sup>1,2</sup>, А.А. Сердобинцев<sup>2</sup>, И.О. Кожевников<sup>2</sup>,  
А.В. Стародубов<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>Саратовский филиал ИРЭ им. В.А. Котельникова РАН.

<sup>2</sup>Саратовский национальный исследовательский государственный университет  
им. Н.Г. Чернышевского

E-mail: [ozshoginis@gmail.com](mailto:ozshoginis@gmail.com)

Исследования в диапазоне частот суб-ТГц и ТГц [1] вызывают большой интерес благодаря их огромному потенциалу для применения в современных беспроводных информационно-коммуникационных системах с высокой скоростью передачи данных. Кроме того, такие волны способны проникать через неметаллические материалы для обнаружения скрытых объектов. ТГц-диапазон частот также позволяет выявлять характерные спектральные особенности различных веществ, что открывает широкие перспективы для его применения в спектроскопии [1-3]. Современные технологии микроразмерного производства, такие как литография, глубокое реактивное ионное травление, микрофрезерование с числовым программным управлением, а также технологии аддитивного производства, такие как стереолитографическая 3D-печать и 3D-печать с цифровой обработкой света (DLP) значительно сокращают время и ресурсы, необходимые для создания прототипов.

В рамках исследований была разработана методика прототипирования электродинамических структур [4] для приборов вакуумной электроники суб-ТГц диапазона, на основе технологии DLP 3D-печати и последующей металлизации изготовленных изделий с помощью магнетронного распыления [5]. Были изучены особенности проектирования и создания тестовых структур, а также проведены детальные исследования их морфологии.

На начальном этапе было изготовлено несколько образцов прямоугольных волноводов стандартов WR10 и WR15, предназначенных для работы в диапазонах W (70-110 ГГц) и V (50-70 ГГц) соответственно. Конструкции состоят из двух частей: нижней части с прямоугольным пазом и верхней накладки, соединённых винтами. Результаты электромагнитных измерений показали хорошие характеристики пропускания для прямоугольных волноводов WR-15 и WR-10 с толщиной металлизации 3 мкм. Для WR-15 потери при пропускании составили около -0.2 дБ/см, а для WR-10 – менее -0.4 дБ/см в диапазоне частот 75-110 ГГц.

В ходе текущей работы была разработана одиночная гребёнка, предназначенная для работы в W-диапазоне. На рисунке 1 представлены: (А) трёхмерная модель замедляющей системы (ЗС), разработанная для работы в диапазоне частот W в программе Autodesk Fusion 360; (Б) фотография металлизированной ЗС типа одиночной гребёнки. Макет ЗС спроектирован из двух частей: нижней с элементами структуры и верхней крышки для эффективной металлизации маг-

нетронным распылением. Конструкция состоит из 41 ламели и согласующих секций, по обеим сторонам которых расположены по 11 ламелей с уменьшающейся высотой, а также согласующих переходов к волноводам стандарта WR-10. Изготовленные образцы гребёнки были проверены с использованием оптической и сканирующей электронной микроскопии, что показало точность изготовления с погрешностью менее 3%.

В данной работе была разработана и апробирована технология прототипирования электромагнитных компонентов миллиметрового диапазона, включающая DLP-3D-печать и магнетронное распыление. Ранее были изготовлены прямые волноводные секции WR10 и WR15, которые продемонстрировали хорошие результаты при измерениях характеристик пропускания. Также разработана ЗС с периодической решеткой, чьи компоненты анализировались с использованием оптической микроскопии и СЭМ. В настоящее время проводятся холодные измерения электромагнитных параметров одиночной гребёнки.

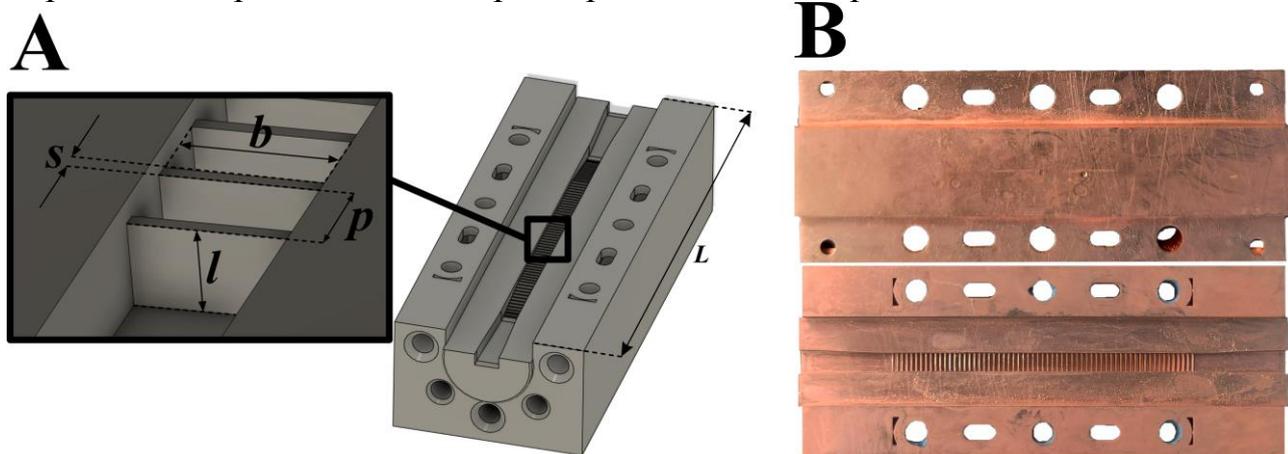


Рис. 1. (А) Трёхмерная модель ЗС для работы в диапазоне частот  $W$ . Геометрические параметры одиночной гребёнки: ширина канала  $b = 1.9$  мм, толщина ламели  $s = 0.162$  мм, период  $p = 0.513$  мм, высота ламели  $h = 0.9$  мм, длина макета  $L = 50.49$  мм. Фланцы соответствуют требованиям стандарта WR10 (2.54 мм × 1.27 мм).; (В) Фото изготовленной ЗС типа одиночной гребёнки, сверху крышка, снизу – основание замедляющей системы.

*Работа выполнена при финансовой поддержке РФФ, проект No. 22-49-02017*

### Библиографический список

1. G.-S. Park, M. Tani, J.-S. Rieh, S.Y. Park, *Advances in Terahertz Source Technologies* // Eds. New York: Jenny Stanford Publishing, 2024.
2. T. Kürner, D.M. Mittleman, T. Nagatsuma, *THz Communications*. // Eds. Springer Series in Optical Sciences, vol. 234. Cham: Springer International Publishing, 2022.
3. J.-S. Rieh, *Introduction to Terahertz Electronics*, Cham: Springer, 2021.
4. N.M. Ryskin, I.S. Ozhogin, A.V. Starodubov, A.A. Serdobintsev, et al. *Microfabrication of prototypes of millimeter-band electromagnetic components by using DLP 3D printing and magnetron sputtering* // 2024 8th IEEE Electron Devices Technology & Manufacturing Conference (EDTM), pp. 577-579, 3-6 March 2024, Bangalore, India.
5. A.V. Starodubov, A.A. Serdobintsev, et al., *Magnetron co-sputtered  $\mu$ -thick Mo-Cu films as structural material with low heat extension for key parts of high-power millimeter-band vacuum microelectronic devices*, // J. Vac. Sci. Technol. B. 2022. Vol. 40, no. 1. P. 014201.

## РОЛЬ ОКИСЛИТЕЛЬНО-ВОССТАНОВИТЕЛЬНЫХ РЕАКЦИЙ ПРИ ДЕТЕКТИРОВАНИИ СПИРТОВ И КЕТОНОВ ГАЗОВЫМ СЕНСОРОМ НА ОСНОВЕ $\text{SnO}_2$ . DFT ИССЛЕДОВАНИЕ

А.А. Петрунин<sup>1</sup>, О.Е. Глухова<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>Саратовский национальный исследовательский государственный университет им. Н.Г. Чернышевского

<sup>2</sup>Первый Московский государственный медицинский университет имени И. М. Сеченова  
E-mail: sacha.petrunin@gmail.com.

До сих пор пространство запахов оставалось недоступным для аналитического инструментария, поскольку мы еще не знаем, как правильно создать его основу для тысяч химических компонентов и их смесей в газовой фазе [1,2]. Очевидно, что у нас есть методы, такие как спектрометрия или хроматография, которые позволяют достаточно хорошо различать даже сложные соединения [3,4], но не так быстро и просто, как это делают люди [5]; например, нет дешевых приборов, которые могли бы помочь потребителям контролировать продукты питания и их качество на месте [6].

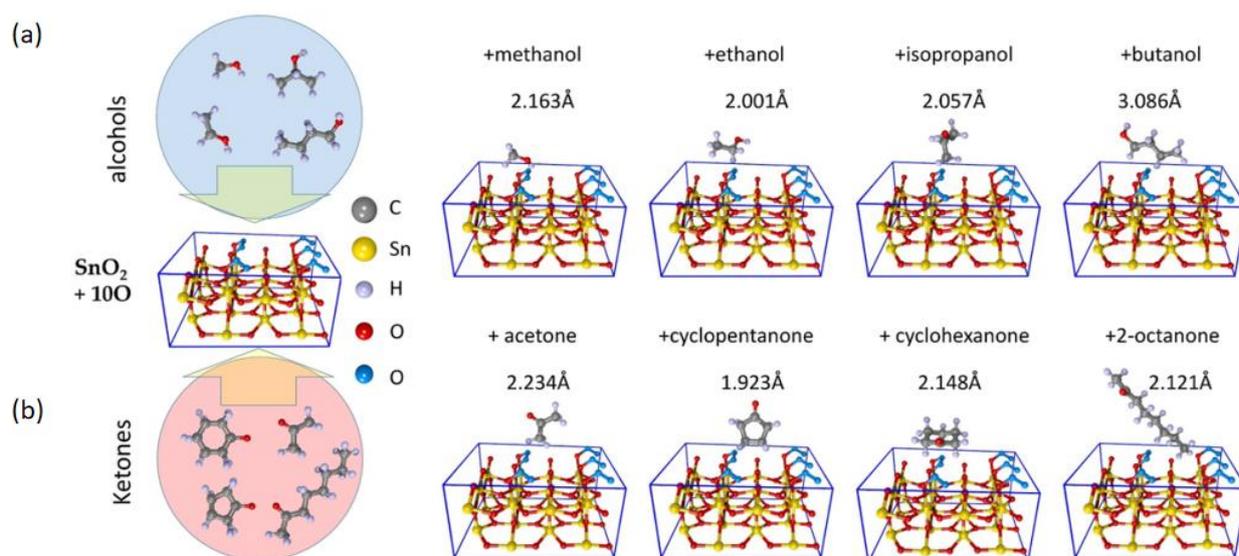


Рис. 1. DFT–моделирование взаимодействия между  $\text{SnO}_2$ , содержащим 10 адсорбированных атомов кислорода и молекулами (а) спиртов – метанола, этанола, изопропанола, бутанола и (б) кетонов - ацетона, циклопентанона, циклогексанона, 2-октанона.

В рамках исследования в качестве чувствительного элемента газового сенсора рассматривались квази-2D  $\text{SnO}_2$  тонкие пленки с поверхностью (110). В роли аналитов выступали молекулы спиртов (метанол, этанол, изопропанол, бутанол) и кетонов (ацетон, циклогексанон, циклопентанон, 2-октанон). При расчетах поверхность пленки  $\text{SnO}_2$  покрывалась атомами кислорода, которые всегда присутствуют в воздухе. Тем самым, реализовывалось моделирование поведения сенсора на основе квази-2D  $\text{SnO}_2$  пленки в воздушной среде. Впервые рассчитывается хеморезистивный отклик квази-2D  $\text{SnO}_2$  покрытых атомами кислорода при адсорбции спиртов и кетонов.

Обменно-корреляционное взаимодействие описывалось в рамках функционала GGA в параметризации PBE (Perdew-Burke-Ernzerhof). Для описания дальнедействующего взаимодействия поверхности пленки SnO<sub>2</sub> с аналитами использовалась дисперсионная поправка Гримма (DFT-D). Применялся базисный набор поляризационных функций DZP (двойная зета-базис плюс) с энергией отсечки 600 Ry и разбиением обратного пространства на сетку 5×5×1 по методу Монхорст-Пака. Поиск равновесной конфигурации во всех расчетах осуществлялся с помощью алгоритма FIRE (Fast Inertial Relaxation Engine) [7]. Критерием сходимости расчетов служила величина силы 0.04 эВ/Å. Анализ распределения электронной плотности по атомам суперъчейки проводился методом расчета парциальных зарядов по Малликену.

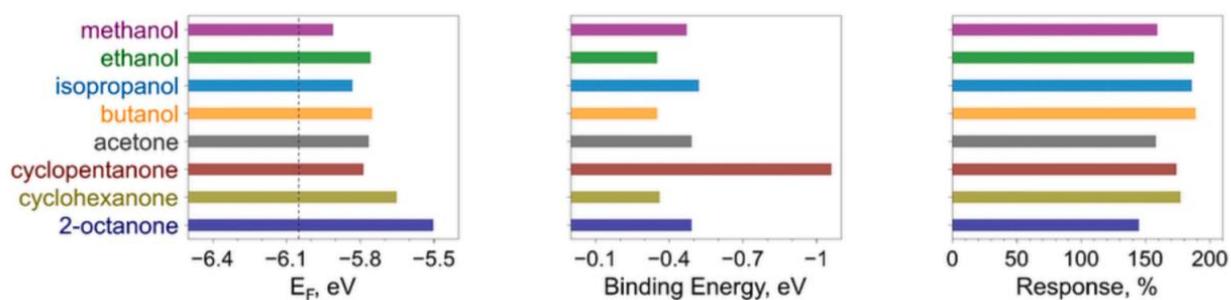


Рис. 2. Изменение энергии Ферми (слева), энергии связи (посередине) и хеморезистивной реакции (справа).

По итогам проведенного исследования получены следующие результаты: выявлены закономерности влияния аналитов на зонную структуру оксида олова, включая энергетическую щель и уровень Ферми; выявлены закономерности перетекания электронного заряда аналит–поверхность SnO<sub>2</sub>; выявлены закономерности изменения электропроводности оксида олова с появлением на поверхности аналитов; проведен анализ хеморезистивного отклика оксида олова к аналитам из газовой фазы на основе рассчитанных данных.

Полученные результаты будут востребованы при разработке высокочувствительных устройств типа «электронный нос», способных качественно и количественно распознавать целевые аналиты из газовой фазы, включая спирты и кетоны.

### Библиографический список

1. Lilienfeld O.A., Müller K.-R., Tkatchenko A. // Nat. Rev. Chem. 2020. V. 4(7). Pp. 347–358.
2. Haddad R., Khan R., Takahashi Y.K., Mori K. et al. // Nat. Methods 2008. V. 5(5). Pp. 425–429.
3. Delafield D.G., Lu G., Kaminsky C.J., Li L. // TrAC Trends Anal. Chem. 2022. V. 157. P. 116761.
4. Lussac E., Barattin R., Cardinael P., Agasse V. // Crit. Rev. Anal. Chem. 2016. V. 46(6). Pp. 455–468.
5. Ravia A., Snitz K., Honigstein D., Finkel M., et al. // Nature 2020. V. 588 (7836). Pp. 118–123.
6. Lewis A., Edwards P. // Nature 2016, V. 535(7610) Pp. 29–31.
2. Bitzek E., Koskinen P., Gähler F., Moseler M., Gumbsch P. // Phys. Rev. Lett. 2006. V. 97(17). P. 170201.

## ЧИСЛЕННОЕ 3D МОДЕЛИРОВАНИЕ РАСПРОСТРАНЕНИЯ ЭЛЕКТРОННОГО ПОТОКА В ДВУХСТУПЕНЧАТОМ КОЛЛЕКТОРЕ С НАРУШЕНИЕМ АКСИАЛЬНОЙ СИММЕТРИИ В СОСТАВЕ МОЩНОЙ ЛБВ КУ(К)-ДИАПАЗОНА

Ф.П. Разуваев<sup>1,\*</sup>, И.П. Медведков<sup>1</sup>, И.А. Чистяков<sup>1,2,3</sup>

<sup>1</sup>Акционерное общество «Научно-производственное предприятие «Алмаз», г. Саратов

<sup>2</sup>Саратовский национальный исследовательский государственный университет им. Н.Г. Чернышевского, г. Саратов

<sup>3</sup>Саратовский филиал ИРЭ РАН им. Котельникова, г. Саратов

\*RazuvaevFP@almaz-rpe.ru

Численное моделирование электронных потоков в электронно-оптических системах (ЭОС) для современных ламп бегущей волны (ЛБВ) с использованием трехмерного программного обеспечения является актуальным и перспективным направлением, т.к. традиционные двумерные модели не всегда достаточно полно описывают реальные физические процессы в ЛБВ, особенно в случае сложной геометрии элементов и неоднородных электромагнитных полей. К тому же трёхмерное моделирование позволяет разрабатывать новые типы ЭОС, которые были недоступны с использованием 2D методов. [1-2]

Целью данной работы является численное 3D моделирование распространения электронного потока в двухступенчатом коллекторе с нарушением аксиальной симметрии в составе мощной ЛБВ Ку(К)-диапазона частот с выходной мощностью не менее 750 Вт с использованием авторской 3D программы (3D программа) [3] и CST Microwave Studio (CST) с последующим сравнением результатов.

В расчётах использовалась конструкция двухступенчатого коллектора с нарушением аксиальной симметрии в виде цилиндрических электродов [4]

В основе авторской программы лежит решение задачи Пуассона методом «cloud in cell» и конечных разностей. О модели вторичной эмиссии подробно написано в следующей статье [6]

При расчёте в CST применялся модуль Particle Studio, позволяющий проводить траекторный анализ заряженных частиц с помощью алгоритмы particle-in-cell (PIC). Для учёта вторичной электронной эмиссии применялась модель Фурмана

Проведено численное моделирование различных режимов работы коллектора. На рис. 1 представлены результаты расчёта по 3D программе (а) и CST (б) в сечении XZ статическом режиме без учёта вторичной электронной эмиссии. Напряжение на первом и втором электродах коллектора составляют 50% и 25% от напряжения замедляющей системы соответственно. В обоих случаях 100% электронного потока оседает во второй ступени.

Далее был проведён расчёт коллектора в статическом режиме с учётом вторичной эмиссии по 3D программе и CST (рис. 2. (а-б)).

Дополнительно был проведён расчёт коллектора в динамическом режиме в 3D программе. Распределение токооседания выглядят следующим образом: 49% тока осело на первую ступень, 50.5% на вторую. Обратный поток электронов из

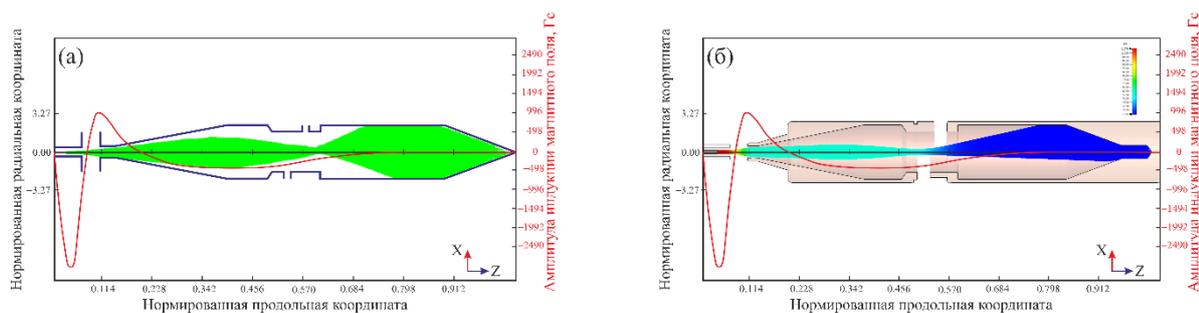


Рис. 1. Статический режим коллектора без вторичной эмиссией по 3D программе и CST

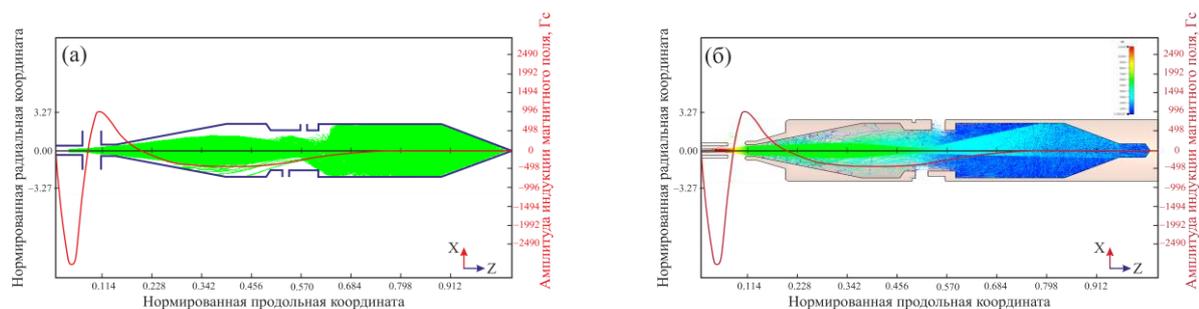


Рис. 2. Статический режим коллектора с вторичной эмиссией по 3D программе и CST

коллектора составил менее 1%, что является приемлемым для практики значением.

В данной работе проведено численное моделирование и сравнение результатов расчёта неаксильносимметричного двухступенчатого коллектора в различных режимах работы по авторской 3D программе и CST. В дальнейшем планируется расчёт коллектора в динамическом режиме по CST, с последующим тепловым расчётом.

Авторы работы выражают особую благодарность к.ф.-м.н. В.И. Роговину за полезное и конструктивное обсуждение данного материала.

### Библиографический список

1. Петросян А. И., Роговин В. И., Семенов С. О. Исследование характеристик высокоперевансных электронно-оптических систем // Прикладная физика. 2012. № 2. С. 54-59.
2. Разработка 19-лучевого клистрона X-диапазона / Д. Н. Золотых, Л. В. Кузнецова, М. А. Манжосин [и др.] // Электронная техника. Серия 1: СВЧ-техника. 2013. № 3(518). С. 107-109. – EDN TLTURD.
3. Журавлева В. Д., Семенов С. О. Комплекс программ расчета трехмерных электронно-оптических систем // Прикладная физика. 2006. № 3. С. 97-102
4. Патент № 2291514 РФ, МКИ Н 01 J 23/027. Многоэлектродный коллектор электровакуумного СВЧ-прибора О-типа / С.О. Семенов, В.И. Роговин, А.Б. Данилов (Россия). ФГУП «НПП «Алмаз» (Россия) -№ 2005122534/09; Заявлено 15.07.2005. Опубл. 10.01.2007. БИ 1
5. Semenov S. O., Zhuravleva V. D., Rogovin V. I. 3D electron optics analyses // 4th IEEE International Conference on Vacuum Electronics, 2003. IEEE, 2003. P. 381-382.

## АВТОМОДЕЛЬНЫЙ ХАРАКТЕР ГЕНЕРАЦИИ ИМПУЛЬСОВ СВЕРХИЗЛУЧЕНИЯ В ЛАЗЕРАХ НА СВОБОДНЫХ ЭЛЕКТРОНАХ С ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЙ НАКАЧКОЙ

А.А. Ростунцова<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>Саратовский филиал ИРЭ им. В.А. Котельникова РАН.

<sup>2</sup>Саратовский государственный университет им. Н.Г. Чернышевского

E-mail: [rostuncova@mail.ru](mailto:rostuncova@mail.ru)

Лазеры на свободных электронах (ЛСЭ) — класс приборов, в которых происходит взаимодействие релятивистских пучков электронов, колеблющихся в поле накачки, с незамедленными электромагнитными (ЭМ) волнами [1]. Принцип работы ЛСЭ основан на вынужденном параметрическом распаде поля накачки на ЭМ сигнальную волну (полезный сигнал) и волну пространственного заряда в электронном пучке [2]. Если в качестве накачки используется ЭМ волна оптического диапазона, попутная с электронами, энергия которых составляет порядка нескольких МэВ, то рассеянное излучение распространяется во встречном направлении и лежит в терагерцевом диапазоне в соответствии с условиями трёхволнового параметрического резонанса:

$$\omega_s = \omega_p - \omega_i, \quad k_s = k_p - k_i, \quad (1)$$

где  $\omega_{s,p,i}$  и  $k_{s,p,i}$  — частоты и волновые числа сигнальной волны, волны накачки и «холостой» медленной волны пространственного заряда в электронном пучке, соответственно. Качественный вид дисперсионной диаграммы трёхволнового взаимодействия представлен на рис. 1. Как показано в [1], в такой модели ЛСЭ возможна генерация короткого импульса сверхизлучения (СИ), что представляет практический интерес в терагерцевом диапазоне.

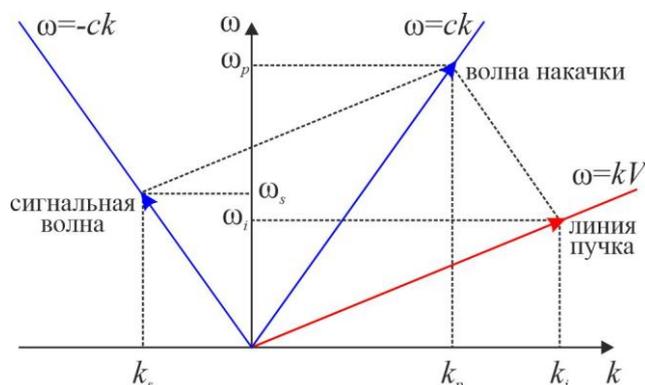


Рис. 1. Дисперсионная диаграмма трёхволнового взаимодействия в рассматриваемой модели ЛСЭ.

В настоящей работе представлены результаты исследования автомоделного характера генерации импульса СИ в ЛСЭ с попутной ЭМ накачкой. Анализ автомоделных решений позволяет установить законы эволюции параметров импульса во времени и пространстве, на основе чего можно определить оптимальные режимы работы прибора.

Рассматривались уравнения нелинейной нестационарной теории ЛСЭ [2]

$$\frac{\partial a_s}{\partial \tau} - \frac{\partial a_s}{\partial \xi} = i a_p I^*, \quad \frac{\partial a_p}{\partial \xi} = i \varepsilon a_s I, \quad \frac{\partial^2 \theta}{\partial \xi^2} = \text{Im} [a_p a_s^* e^{i\theta}], \quad I = \frac{1}{\pi} \int_0^{2\pi} \exp(-i\theta) d\theta_0, \quad (2)$$

где  $a_s$  и  $a_p$  — безразмерные амплитуды сигнальной волны и волны накачки, соответственно,  $\theta$  — фаза электрона относительно комбинационной волны,  $I$  — амплитуда первой гармоники сгруппированного тока,  $\xi$  и  $\tau$  — безразмерные координата и время, соответственно,  $\varepsilon$  — параметр истощения накачки. В пределе  $\varepsilon \ll 1$  система (2) сводится к уравнениям взаимодействия в лампе обратной волны (ЛОВ), генерация импульса СИ в которой также носит автомодельный характер [3].

Для системы уравнений (2) найдены автомодельные подстановки. Автомодельное решение для сигнальной волны представляет собой импульс с осциллирующим хвостом, который в процессе своего движения навстречу электронному пучку усиливается и сжимается (см. рис. 2 (а)). Амплитуда импульса растёт пропорционально  $\tau^{3/2}$ , а ширина сокращается как  $\tau^{-1}$ . В численном моделировании уравнений (2) показано, что эволюция пиковой амплитуды импульса сигнальной волны проходит через несколько этапов (см. рис. 2 (б)). После некоторого переходного процесса, в результате которого из случайных флуктуаций формируется импульс, решение выходит на стадию, соответствующую автомодельному решению уравнений ЛОВ, когда амплитуда импульса растёт линейно с увеличением  $\tau$ . Это связано с тем, что на ранних временах эффект истощения накачки достаточно слаб. С течением времени потери энергии волной накачки накапливаются, и после некоторого переходного процесса эволюция импульса выходит на другую автомодельную стадию, соответствующую найденному автомодельному решению уравнений (2). Достигая границы, импульс покидает систему, что соответствует стадии насыщения на рис. 2 (б).

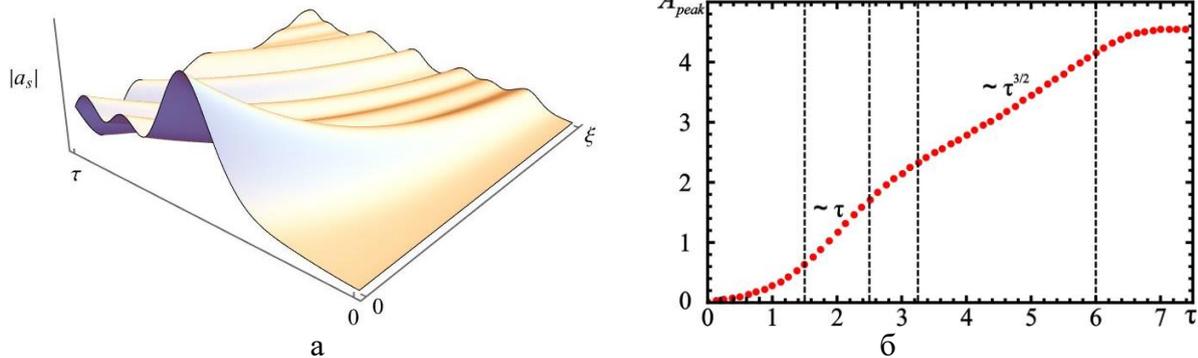


Рис. 2. Качественный вид пространственно-временного распределения амплитуды поля автомодельного решения для сигнальной волны (а) и пример зависимости пиковой амплитуды импульса СИ от времени, полученный в численном моделировании (б).

### Библиографический список

1. Маршалл Т. Лазеры на свободных электронах. М.: Мир, 1987. 240 с.
2. Рыскин Н.М., Балякин А.А., Дмитриева Т.В. Нелинейная динамика распределенных систем: системы с запаздыванием, вакуумные микроволновые приборы, системы взаимодействующих нелинейных волн. LAP Lambert Academic Publishing, 2011. 504 с.
3. Гинзбург Н.С., Юровский Л.А., Назаровский А.В., Сергеев А.С., Зотова И.В. // Письма в ЖТФ. 2020. Т. 46, вып. 23. С. 8–12.
4. Ростунцова А.А., Рыскин Н.М. // ЖЭТФ. 2018. Т. 154, вып. 4 (10). С. 691-697.

## ЯВЛЕНИЕ ПЕРЕМЕЖАЕМОСТИ В НОЧНЫХ ЗАПИСЯХ ЭЭГ И ЭКГ СИГНАЛАХ НА ОСНОВНОЙ ЧАСТОТЕ РИТМА СЕРДЦА

А.Е. Руннова<sup>1</sup>, М.О. Журавлев<sup>2</sup>, Н.С. Акимова<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Саратовский государственный медицинский университет им. В.И. Разумовского

<sup>2</sup>Саратовский национальный исследовательский государственный университет  
им. Н.Г. Чернышевского

E-mail: a.e.runnova@gmail.com

Синхронизация и перемежаемость при разрушении синхронизации активно изучаются в живых системах. Например, в работе [1] рассматривается возникновение перемежаемости в сердечно-сосудистой системе человека. Мы рассматриваем взаимодействующее поведение на границах временной синхронизации в случае реальных сигналов ЭЭГ и ЭКГ, зарегистрированных во время ночного сна пациентов с апноэ и здоровых добровольцев. Нами продемонстрировано, как режимы синхронной и асинхронной динамика сменяются во время ночных записей, и какие закономерности отвечают за это изменение поведения, что дает понимание механизмов перехода от синхронного поведения к асинхронному с точки зрения подходов синхронизации временных масштабов [2].

Рассмотрены данные 10 испытуемых. Протокол исследования был одобрен этическим комитетом Саратовского государственного медицинского университета Минздрава России. Каждый участник имел две зарегистрированные полисомнографии. Всем пациентам в первую ночь проводились измерения артериального давления. Для каждого пациента пульсовое давление, оценивалось как разность систолического и диастолического давлений,  $BP_{sys} - P_{dia}$ . Полисомнография использовалась для определения количества ночных приступов апноэ (NAp) и гипопноэ (NHyp), а также индекса апноэ (AHI). Все участники исследования были разделены на две группы – практически здоровые добровольцы с нормальным сном без патологий и пациенты с ночным апноэ сна. В таблице 1 приведено описание участников этих групп. В данной работе мы численно оценивали всю электрофизиологическую активность в течение ночи как непрерывный процесс, без деления на стадии сна. В работе [3] было показано, синхронизация между различными каналами ЭЭГ изменяется незначительно в разные стадии сна по сравнению со средним за весь период сна. Кроме того, оценка перемежаемости была возможна только на длительных рядах, что может быть обеспечено лишь при полной записи ночного сна.

При численном анализе синхронизации временных масштабов и оценке перемежаемости использовались сигналы ЭЭГ и ЭКГ. Для сигнала ЭЭГ рассматривалась частотная составляющая, соответствующая основному ритму сердца. На данной частоте оценивалась разность фаз между ЭЭГ и ЭКГ сигналами. Для рассчитанных временных зависимостей разностей фаз между каждым из каналов ЭЭГ и ЭКГ для всех двадцати ночных записей сна десяти добровольцев были получены распределения длительностей ламинарных стадий синхронной динамики. Использованная концепция синхронизации временных масштабов позво-

ляет ввести мгновенную разность фаз сигналов ЭЭГ и ЭКГ с помощью непрерывного вейвлетного преобразования на постоянно изменяющейся частоте сердечного ритма.

**Таблица 1:** краткое описание физикальных характеристик участников исследования. Для пациентов с апноэ значения  $NAp$  и  $NHyp$ , а также  $ANI$  приводятся для первой и второй ночей

Здоровые участники	Возраст, годы	пол	Рост, см	Вес, кг	$NAp$	$NHyp$	$ANI$	$BP_{sys}$	$BP_{dia}$
1	51	М	164	60	-	-	-	95	60
2	22	Ж	174	66	-	-	-	110	70
3	41	М	164	53	-	-	-	120	80
4	26	Ж	176	70	-	-	-	90	60
5	33	Ж	158	70	-	-	-	110	80
<b>Пациенты с апноэ</b>									
6	48	М	175	82	331	36	56.5	160	100
					312	45	50.5		
7	49	Ж	158	73	7	91	15.2	140	90
					32	123	22.2		
8	41	М	177	80	6	44	10.1	146	92
					99	104	29.7		
9	67	Ж	167	88	80	46	22.2	160	104
					105	72	23.9		
10	47	Ж	170	110	76	214	40	126	98
					976	222	41.7		

Результаты оценки экспоненциального закона перемежающейся динамики не различаются у пациентов с апноэ и здоровыми участниками. В то же время, наибольший интерес для сравнения с физиологическими параметрами пациентов представляет в данном случае коэффициент наклона экспоненциального закона ламинарных стадий динамики. Корреляция между характеристикой пульсового давления участников исследования и величинами наклона закона, оказывается весьма значительной, коэффициент корреляции достигает 0,8 – 0,85. Таким образом, по всей видимости, артериальное давление оказывает существенное влияние не только на динамику сердечно-сосудистой системы, но и меняет характеристики электрической активности головного мозга, изменяя длительности ламинарных фаз синхронной динамики между ЭКГ и ЭЭГ.

Для определения типа перемежающейся динамики воспользуемся методом вращающейся фазовой плоскости согласно [4]. Исходя из медико-биологических

соображений, сердечно-сосудистая система представляет собой автономный генератор и выступает в качестве ведущей системы на частоте сердечного ритма. ЭЭГ активность является ведомой системой. На основе данного метода был построен рисунок 1, на котором изображены проекции фазовой траектории ( $x_{\text{EEG}}$ ,  $y_{\text{EEG}}$ ) на вращающейся плоскости ( $X'$ ,  $Y'$ ) для рассматриваемой системы ЭЭГ – ЭКГ в моменты ламинарных фаз и турбулентных всплесков. На данном рисунке приведено два характерных типа поведения рассматриваемой траектории: первый представлен на рисунках 1, (б), (г), где траектория (ЭЭГ, ЭКГ) охватывает начало координат в моменты возникновения турбулентного всплеска. Данный тип поведения может соответствовать перемежаемости типа угольного ушка [5], где траектория (ЭЭГ, ЭКГ) представлена на рис. 5, (б), (д) соответствует динамике ламинарных стадий, когда фазовая траектория не охватывает начало координат.

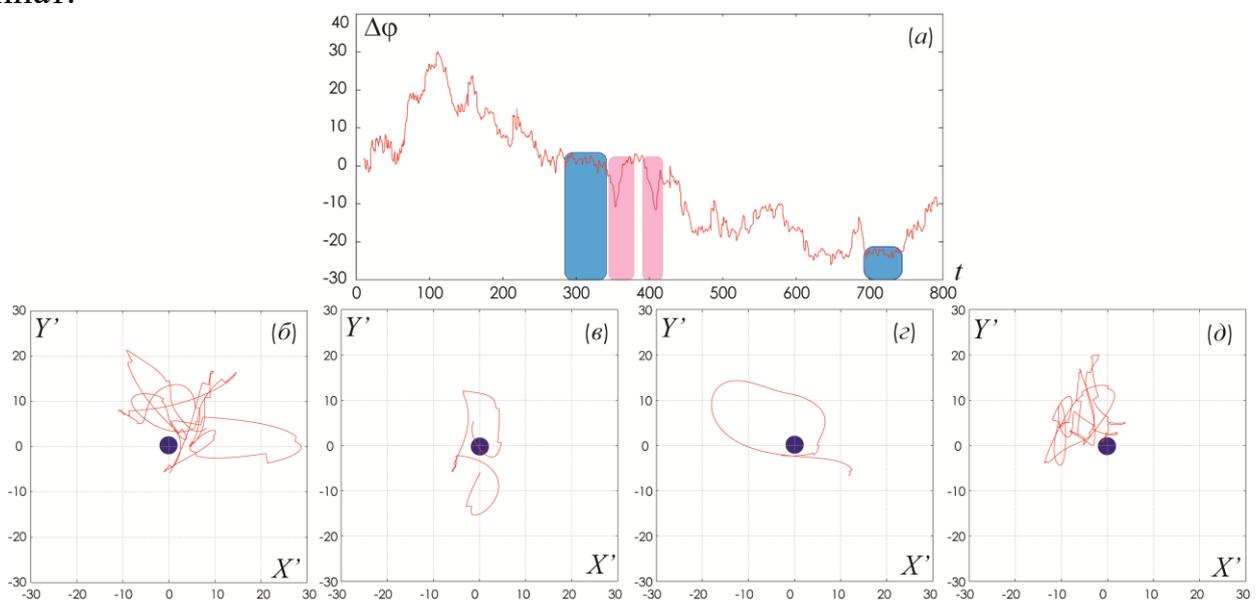


Рисунок 1. (а) Разность фаз, приведенная к диапазону значений  $[-2\pi; 2\pi]$ , рассчитанная для каналов О1 и ЭКГ, (б), (г), (д) - анализ движения фазовой траектории ЭЭГ для фрагментов временной зависимости разности фаз в соответствии с порядком, показанным на рисунке (а). На рисунке (а) синим цветом показаны ламинарные, розовым – турбулентные стадии фазовой динамики. Синей точкой на рисунках (б) – (д) показан центр фазовой плоскости,  $(0; 0)$

*Исследование выполнено в рамках государственного задания Минздрава РФ «Разработка портативного программно-аппаратного комплекса для дистанционного мониторинга функции сердечно-сосудистой системы, а также автоматизации теста с 6-минутной ходьбой у пациентов с хроническими неинфекционными заболеваниями» № 056-03-2024-071*

#### Библиографический список

1. Hramov A. E., Koronovskii A. A., Moskalenko O. I., et al. // Chaos: An Interdisciplinary Journal of Nonlinear Science. 2013. Vol.23.
2. Hramov A., Koronovskii A. // Physica D: Nonlinear Phenomena. 2005. Vol. 206. P. 252–264.
3. Zhuravlev M., Agaltsov M., Kiselev A., et al. // Scientific Reports. 2023. Vol. 13.
4. Hramov A. E., Koronovskii A. A., Kurovskaya M. K., Boccaletti S. // Phys. Rev. Lett. 2006. Vol. 97. P. 114101.
5. Pikovsky A. S., Osipov G. V., Rosenblum M. G., et al. // Phys. Rev. Lett. 1997. Vol. 79, No. 1. P. 47–50.

## РЕКУРРЕНТНЫЙ АНАЛИЗ ДАННЫХ ЭЭГ ПАЦИЕНТОВ ПОСЛЕ ОРТОДОНТИЧЕСКОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ

**А.О. Сельский, Е.П. Емельянова, Е.Е. Дрождева**

*Саратовский национальный исследовательский государственный университет*

*им. Н.Г. Чернышевского*

*E-mail: [selskiiao@gmail.com](mailto:selskiiao@gmail.com)*

Одной из важных, но мало изученных проблем является вопрос о влиянии длительного лечения на состояние пациента [1]. Особенно данная проблема важна в случае, если лечение сопровождается дискомфортом или болевыми ощущениями. Именно такая ситуация часто возникает при ортодонтическом лечении [2]. Несмотря на явное преимущество сокращения времени ношения ортодонтических аппаратов, связанное со снижением их отрицательного влияния на зубы и околозубные ткани, возникают вопросы об адаптационных возможностях челюстно-лицевого аппарата и окружающих его тканей для быстрой перестройки данной системы при ускорении коррекции [3]. В настоящей статье предпринята попытка расширить для специалистов данной области спектр объективных диагностических возможностей в оценке наблюдения за адаптационными процессами пациентов. А именно, будет использован анализ электроэнцефалографических записей в процессе определения когнитивного статуса пациента.

Для анализа в ходе экспериментальных записей пациенты проходили когнитивные тесты, так как в некоторых исследованиях было отмечено, что длительное воздействие боли и стресса приводят к снижению когнитивных функций [4]. В качестве самих тестов использовались хорошо известные в области нейронаук задачи на счет, запоминание, концентрацию внимания, к примеру, таблицы Шульте [5]. Всего в каждом эксперименте было четыре разных теста, чтобы оценить влияние ортодонтического воздействия на различные когнитивные функции. Кроме того, чтобы отследить динамику изменения рекуррентных показателей эксперимент для каждого пациента проводился трижды. Первый раз до установки брекет-системы или элайнеров. Второй раз сразу после ортодонтического вмешательства. Третий эксперимент проводился спустя некоторое время после второго и призван продемонстрировать возникшие в результате длительного стресса изменения.

В качестве основного метода анализа данных ЭЭГ в настоящей работе предлагается использовать сравнение рекуррентных показателей. Рекуррентный анализ позволяет работать с существенно нелинейными и хаотическими сигналами и сравнивать их между собой с минимальными нормировками, так как метод не зависит от амплитудных характеристик сигнала и подсчитывает только число возвратов на фиксированном временном ряду [6]. Кроме того, рекуррентные показатели являются довольно устойчивыми в статистическом смысле в рамках одного эксперимента или теста, что позволяет работать даже с малыми статистическими выборками данных [7].

Для каждого пациента было проанализировано по три экспериментальной записи, где для каждого канала было рассчитано 20 рекуррентных показателей  $RR_i$ . Для сравнения динамики рекуррентных показателей между пациентами и

между разными экспериментальными записями необходимо провести некоторую нормировку полученных показателей. С этой целью были найдены для каждого эксперимента и каждого канала среднее значение рекуррентного показателя ( $NRR_i$ ), а в качестве нормированного значения используется разность между текущим значением и средним.

Кроме того, в описанной процедуре проведения экспериментов первый эксперимент - до ортодонтического воздействия - может служить в некотором смысле нормальной реакцией пациента на когнитивный тест. Показатель может быть индивидуальным и отличаться в рамках одной группы. Поэтому, кроме нормировки на среднее значение, приведенное выше, будем рассматривать вторую нормировку на средний рекуррентный показатель в первом эксперименте ( $1NNRR_i$ ).

Полученные данные показали, что разница между экспериментами довольно заметна. Более других отличия заметны в височных каналах Т3, Т4, Т5, Т6. Можно уверенно сказать, что, используя локальные записи каналов Т5 и Т6 во время выполнения когнитивного теста, можно отличать пациентов, которым сделали операцию по установке ортодонтического аппарата. В случае, если с течением времени и силой ортодонтического воздействия разброс рекуррентных показателей в данных каналах будет возрастать, то это может являться эффективным маркером, который показывает то, насколько сильно лечение влияет на пациента, чтобы скорректировать лечение.

Кроме этого, предложенная нормировка показывает интересный тренд, связанный с сравнением пациентов с разной силой ортодонтического воздействия во втором и третьем эксперименте. Если для пациентов с элайнерами на 4 зуба нет четкого увеличения разброса рекуррентных показателей для одного из экспериментов, то для пациентов с брекетами тенденции очевидны - разброс во втором эксперименте куда заметнее, чем для третьего эксперимента. Кроме того, у пациентов с элайнерами на 3 зуба, наоборот, разброс возрастает для третьего эксперимента.

*Работа поддержана Российским научным фондом, проект No 23-72-01021.*

#### Библиографический список

1. Bulut O. C., Wallner F., Oladokun D., et al. // Qual Life Res. 2018. V. 27. P. 987–991.
2. de Araujo C. M., Schroder A. G. D., de Araujo B. M. M., et al. // European journal of orthodontics. 2020. V. 42. P. 281–289.
3. Dab S., Chen K., Flores Mir C. // Journal of orthodontics. 2019. V. 22. P. 61–68.
4. Zhuravlev M., Novikov M., Parsamyan R., et al. // Neurosci Bull. 2023. V. 39. P. 1105–1116.
5. Makarov V. V., Zhuravlev M. O., Runnova A. E., et al. // Phys. Rev. E. 2018. V. 98, P. 062413.
6. Yang Y. X., Gao Z. K., Wang X. M., et al. // Chaos. 2018. V. 28. P. 085724.
7. Jenkins B. N., Hunter J. F., Richardson M. J., et al. // Emotion. 2020. V. 20. P. 391–402.

## ВЛИЯНИЕ ДИАФРАГМЫ НА СПЕКТР ПРОПУСКАНИЯ ПОЛОСНО-ПРОПУСКАЮЩЕГО ФИЛЬТРА В X-ДИАПАЗОНЕ ЧАСТОТ

С.В. Середич, А.А. Андреев, Е.А. Рябов

*Саратовский национальный исследовательский государственный университет  
имени Н.Г. Чернышевского  
E-mail: seredichsv@mail.ru*

Фильтры сверхвысоких частот (СВЧ) являются важной и необходимой частью техники СВЧ, так как они используются для выделения сигналов определённого частотного диапазона из общего спектра входного сигнала. Важными параметрами для полосно-пропускающих фильтров являются крутизна, уровень затухания, ширина полосы пропускания и потери. Кроме того, возможность смещения центральной частоты полосы пропускания расширяет функциональные возможности таких фильтров [1 – 4].

В данной работе исследуется периодическая структура с подвижной диафрагмой. Периодическая структура имеет размер отверстий  $g = 9$  мм, расстояние между отверстиями  $r = 22$  мм и диэлектрическую проницаемость  $\varepsilon = 2,5$  (соответствует пластику PETG), исследовалась в работе [5]. В середине периодической структуры добавлен дефект формы «бабочка», в котором располагается диафрагма толщиной 1 мм и шириной  $w = 20$  мм (рис. 1). Численное моделирование проводилось с использованием программного пакета openEMS [6].

На рисунках 2 и 3 представлены спектры коэффициента пропускания периодической структуры при различных значениях высоты  $h$  и угла поворота  $\alpha$  диафрагмы. При добавлении дефекта формы «бабочка» наблюдается резонансный пик пропускания на частоте 7,8 ГГц. При добавлении диафрагмы высотой  $h$  до 7 мм с углом поворота  $\alpha = 0$  градусов резонансный пик не смещается. Диафрагма с углом поворота  $\alpha = 90$  градусов при увеличении высоты  $h$  резонансный пик смещается в низкочастотную область. Максимальное смещение резонансного пика пропускания равняется 0,45 ГГц при диафрагме высотой  $h = 7$  мм.

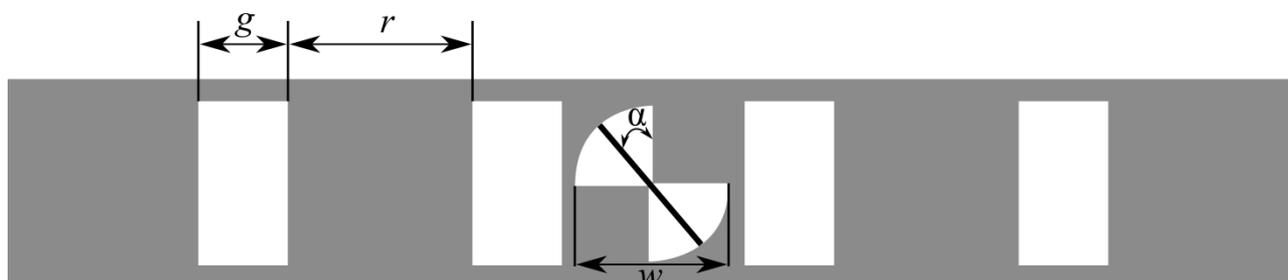


Рис. 1 Конфигурация периодической структуры с дефектом и диафрагмой

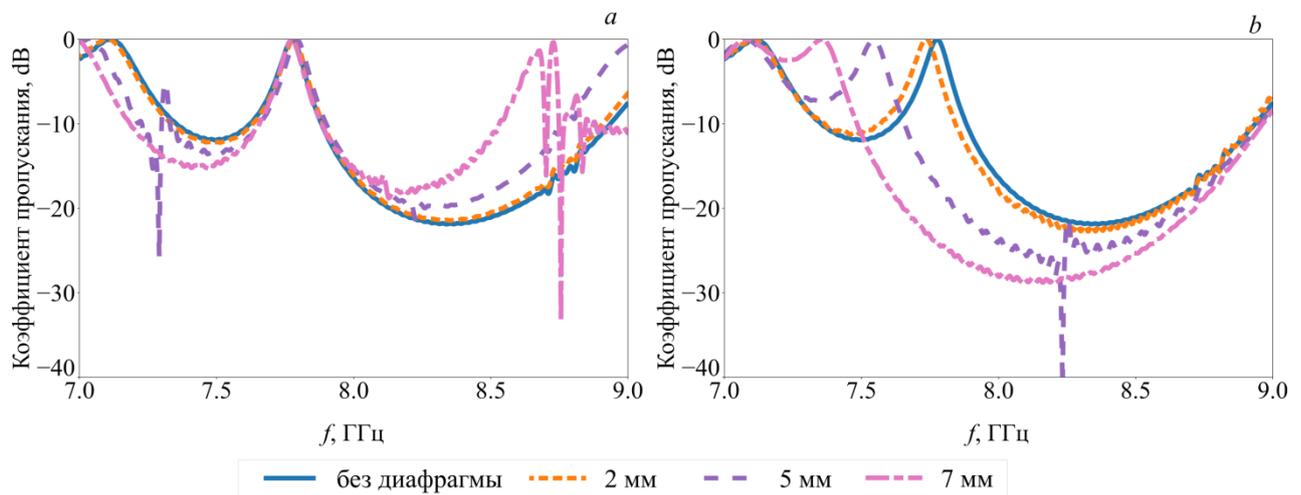


Рис. 2 Спектры коэффициента пропускания периодической структуры с дефектом и диафрагмой  $w = 20$  мм и угле поворота  $\alpha = 0$  градусов (a) и  $\alpha = 90$  градусов (b) при различных значениях высоты  $h$

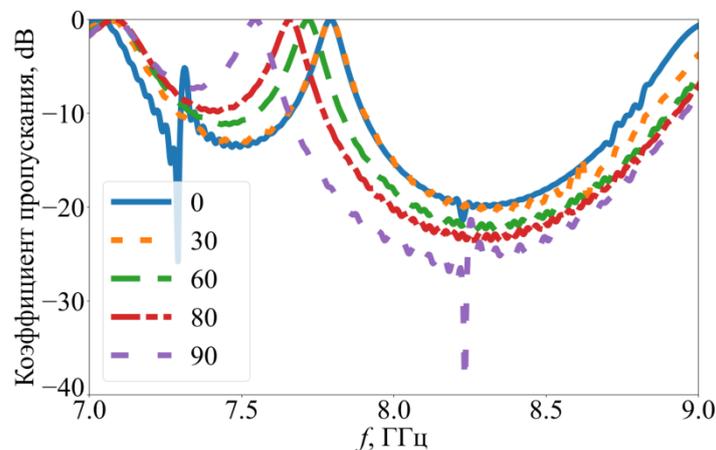


Рис. 3 Спектры коэффициента пропускания периодической структуры с дефектом и диафрагмой  $w = 20$  мм и  $h = 5$  мм при различных углах поворота  $\alpha$

### Библиографический список

1. Комаров В.В., Лукьянов М.А. // Журнал радиоэлектроники. 2021. №. 1. С. 2-2.
2. Замотаева Е.Ю. и др. // Письма в Журнал технической физики. 2013. Т. 39(18). С. 87–94.
3. Козин А. Э., Фисенков А. И. // Электроника и микроэлектроника СВЧ. 2017. Т. 1. С. 506–508.
4. Тюменцев А.И., Хроленко Т.С. // Электроника и микроэлектроника СВЧ. 2017. Т. 1. С. 363–366.
5. Михайлов А.И., Рябов Е.А., Сергеев С.А. // Физика волновых процессов и радиотехнические системы. 2022. Т. 25(3). С. 29–35.
6. Liebig T. et al. // Intern. J. of Numen. Modell. 2013. V. 26(6). P. 680–696.

## РАЗРАБОТКА ВЫВОДА ЭНЕРГИИ УСИЛИТЕЛЯ М-ТИПА W-ДИАПАЗОНА

Д.А. Сидоров<sup>1,2</sup>, А.В. Суховерхий<sup>1</sup>, А.А. Цуканов<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Акионерное общество научно-производственное предприятие «Салют»

<sup>2</sup>Нижегородский национальный исследовательский университет им. Н.И. Лобачевского

E-mail: [daniil\\_sidorov@mail.ru](mailto:daniil_sidorov@mail.ru)

Создание мощных СВЧ усилителей сигналов в коротковолновой части миллиметрового диапазона представляет большой интерес для развития высокоточных когерентных радиоэлектронных систем. В связи с этим ведутся актуальные разработки различных электровакуумных gyro-приборов [1] и приборов О-типа [2]. Главным недостатком gyro-приборов является релятивистские рабочие напряжения, высокие значения магнитных полей и большие массогабаритные параметры. В приборах О-типа стоит задача обеспечения прохождения тока в каналах малого диаметра, и, как следствие, обладают не высокими значениями выходных мощностей. В то же время усилители М-типа, реализованные в сантиметровом и 8-мм диапазонах длин волн, лишены этих недостатков и обладают высокими значениями выходной мощности порядка 10 – 100 кВт при малых габаритах.

Конструкция любого электровакуумного прибора предусматривает наличие вакуумно-плотного вывода СВЧ энергии. Вывод энергии должен обеспечивать хорошее согласование, характеризоваться малыми потерями и иметь высокие теплопроводность и электропрочность. В качестве диэлектрических дисков для окон вывода применяются такие материалы, как ВК94-1, лейко-сапфир, нитрид алюминия, оксид бериллия, пиролитический нитрид бора (ПНБ) и CVD алмаз [3].

В данной работе рассмотрено согласование прямоугольного волновода сечением 2,4x1,2 мм с усилителем М-типа с пространством дрейфа W-диапазона. Усилитель М-типа имеет двухступенчатую резонаторную систему и работает на обратной волне. В такой системе энергия СВЧ-сигнала перемещается против движения электронного потока. Наличие отражения от вывода энергии может привести к возбуждению прибора, поэтому значение КСВН прибора не должно превышать 1,5 в рабочем диапазоне частот.

Задача согласования разделяется на две части: согласование баночного окна с волноводом 2,4x1,2 мм и обеспечения согласования резонаторной системы с волноводным выводом. В качестве диэлектрического диска для вывода энергии был выбран ПНБ, который имеет слабую зависимость характеристик от температуры, обладает достаточно низкими значениями диэлектрической проницаемости  $\epsilon < 5$ , малыми потерями  $tg\delta = 0,5 \div 3 (\times 10^{-4})$  [3].

Расчеты баночного окна проводились с помощью пакета программ CST studio suite (Рис. 1 (а)). Толщина диска из ПНБ составила 0,2 мм при диаметре 2,4 мм. В такой конструкции удалось достичь значения КСВН менее 1,15 в полосе частот от 86,5 до 108 ГГц (Рис. 1 (b)).

Согласование резонаторной системы с целью вывода достигается за счет изменения глубины первых четырех резонаторов на входе и выходе (Рис. 2 (а)).

Для согласования резонаторной системы с волноводом  $2,4 \times 1,2$  применяется плавный переход. Значение КСВН в такой системе не превысило 1,5 в диапазоне частот от 96,5 до 102 ГГц (Рис. 2 (b)).

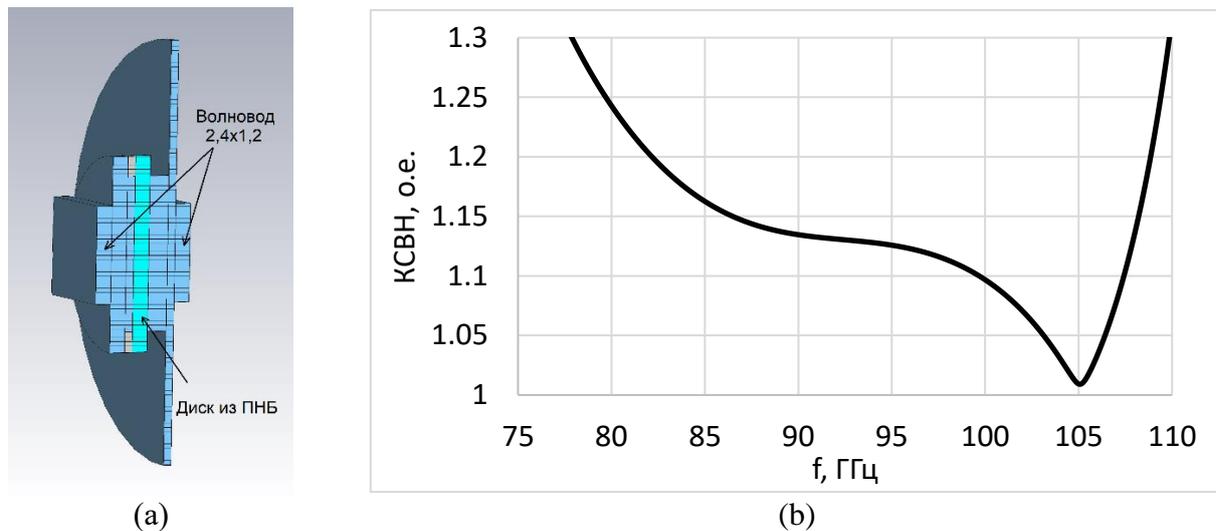


Рис. 1. (a) Общий вид окна вывода в разрезе. (b) Расчетное значение КСВН окна вывода

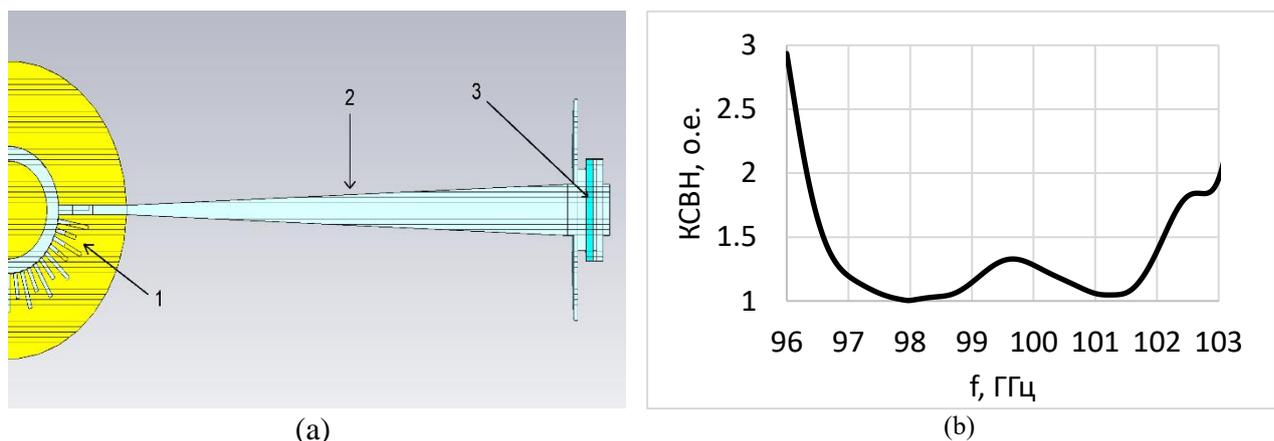


Рис. 2. (a) Общий вид замещающей системы в разрезе. 1 – согласующие штыри, 2 – клиновидный волновод, 3 – баночное окно  
(b) Расчетное значение КСВН системы от частоты

Работа выполнена в рамках государственного контракта № 20411.1950192501.11.003 от 29 декабря 2020 г.

### Библиографический список

1. Засыпкин Е.В. Многорезонаторный гироклистрон непрерывного действия 3-миллиметрового диапазона длин волн // Изв. ВУЗов. Радиофизика. 2022. т.65, №5-6, с.434-447.
2. А.А. Иванов. Увеличение КПД ЛБВ W-диапазона при неизменных энергетических параметрах электронного пучка // XIII Всероссийская научно-техническая конференция "Электроника и микроэлектроника СВЧ". Сборник докладов. Санкт-Петербург. 27 - 31 мая 2024 г. СПб.: СПбГЭТУ «ЛЭТИ». – С. 151-154.
3. Прокофьев Б.В. Выбор диэлектрических материалов для применения в выводах энергии мощных ЭВП СВЧ // Электроника и микроэлектроника СВЧ. 2018. Т. 1. С. 176-181.

## ЧАСТОТНО-ВРЕМЕННЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ СИГНАЛОВ НОЧНОЙ ЭЭГ В РАЗЛИЧНЫХ ОТДЕЛАХ МОЗГА В ЗАВИСИМОСТИ ОТ ХРОНОТИПА

М.А. Симонян<sup>1,2</sup>, Е.Е. Дрождева<sup>1</sup>, А.С. Реджепова<sup>1</sup>, Ю.А. Журавлева<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Саратовский национальный исследовательский государственный университет им. Н.Г. Чернышевского

<sup>2</sup>Саратовский государственный медицинский университет им. В.И. Разумовского Минздрава России

E-mail: [m.a.simonyan@ya.ru](mailto:m.a.simonyan@ya.ru)

Нарушение процессов инициации, пролонгации и супрессии сна тесно связано с общим физическим и психическим состоянием организма человека [1]. ЭЭГ-активность головного мозга имеет свои особенности в зависимости от хронотипов. Уже известно, что утренние типы имеют большую спектральную мощность ЭЭГ-сигналов в диапазоне низких частот (12-14 Гц) по сравнению с вечерними типами, при этом скорость затухания медленноволновой активности (1-5 Гц) больше у утренних типов ( $P = 0,06$ ) [2].

Цель исследования – уточнение особенностей локальной ЭЭГ-активности в 5 зонах головного мозга у здоровых добровольцев, в зависимости от хронотипа, в 20 частотных диапазонах: от 1 до 40 Гц.

Исследованы 103 здоровых добровольца  $27,6 \pm 8,2$  лет, из них 40 (38,83%) мужчин. Критериями включения в исследование стали: возраст старше 18 лет, отсутствие острых и хронических соматических и неврологических заболеваний в фазе обострения, отсутствие дисгормональных, дисэлектролитных состояний, и нарушений циркадных ритмов, отсутствие в анамнезе приема психотропных и иных препаратов, способных оказывать влияние на сон.

Каждому участнику исследования было предложено заполнить опросник Хорна-Остберга для определения хронотипа. Была проведена двукратная запись ночной полисомнограммы (19 отведений) с проведением психофизиологического тестирования до и после записи. По окончании исследования для каждой ночной записи было произведено клиническое стадирование сна согласно современным международным рекомендациям.

Изучение ночной ЭЭГ – активности производилось в 5 зонах: зона №1 – центральная область, зона №2 – затылочная область, зона №3 – лобная область, зона №4 – область левого полушария, зона №5 – область правого полушария. Для анализа применен метод колебательных паттернов, ранее адаптированный к обработке длительных полисомнографических записей [3]. Вся временная реализация полисомнографии разбивалась на временные окна  $\Delta t = 5$  сек., для каждого из анализируемых частотных диапазонов в данном временном окне оценивались средние значения следующих характеристик: (1) количества колебательных паттернов  $N$ , (2) среднего времени жизни колебательных паттернов  $T$  и (3) средней энергии колебательных паттернов  $E$ . Оценка ЭЭГ-активности каждой зоны производилась в 20 частотных диапазонах от 1 до 40 Гц с шагом 2 Гц.

В исследовании приняли участие 49 (47,57%) человек, относившихся к «ритмикам», и 54 «аритмикам» (52,43%).

Анализ характеристик частотных паттернов (их количества и длительности) демонстрирует статистически значимые различия между исследуемыми группами в частотном диапазоне 4-6 Гц.

Энергетическая картина является более сложной и демонстрирует различия практически во всех представленных частотных диапазонах. Выявлены существенные различия для зоны 2 (затылочные каналы) в состояниях пробуждений ото сна и «дремоты» (стадии N1) при оценке количества паттернов в диапазонах 24 – 34 Гц. Наблюдаемые различия находятся на уровне 30 – 40 %. На том же уровне различается и динамика активности головного мозга во фронтальной зоне при пробуждениях. Также наблюдаются различия на уровне 40 – 50 % для состояния бодрствования интегральной активности в зоне левого полушария.

Анализ длительности паттернов демонстрирует различия для зоны 2 (затылочная область активности головного мозга) на протяжении всех стадий сна для диапазонов частот 6 – 8 Гц, 10 – 12 Гц. Для последнего диапазона частот максимальные величины различий характерны для N1 и N3 стадий сна.

Для энергетических характеристик максимальные различия можно увидеть при анализе зоны №4 (левое полушарие головного мозга). Здесь различия начинают наблюдаться с диапазона частот 8 – 10 Гц и продолжают по всем стадиям сна вплоть до 40 Гц. Максимальные различия (выше 50%) наблюдаются для наиболее высокочастотных колебаний в состоянии бодрствования и REM стадии сна.

*Работа выполнена в рамках гранта РНФ № 22-72-10061 «Методы нелинейной динамики в исследовании полисомнографии: механизмы адаптации к нарушению режима сна при различных хронотипах» с 2022 по 2025 гг.*

#### **Библиографический список**

1. Костенко Е.В., Маневич Т.М., Разумов Н.А. // Лечебное дело. 2013. Т. 2. С. 104-116.
2. Mongrain V., Carrier J., Dumont M. // Sleep. 2005. V. 28 (7). P. 819-27.
3. Simonyan M., Fisun A., Afanaseva G., et al. // The European Physical Journal. Special Topics. 2022. P. 1-9.
4. Mongrain V., Dumont M. // Sleep. 2007. V. 30 (6). P. 773-80.

## ЭЛЕКТРОФИЗИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ГРАФЕН-НАНОТРУБНЫХ ГИБРИДНЫХ ПЛЕНОК РАЗЛИЧНОЙ ТОПОЛОГИИ

М.М. Слепченков<sup>1</sup>, П.В. Барков<sup>1</sup>, О.Е. Глухова<sup>1</sup>

<sup>1</sup>*Саратовский национальный исследовательский государственный университет  
им. Н.Г. Чернышевского*

*E-mail: [slepchenkovi@mail.ru](mailto:slepchenkovi@mail.ru)*

Гибридные наноструктуры, образованные графеном и углеродными нанотрубками (УНТ), являются одними из наиболее обсуждаемых в научной литературе современных наноматериалов [1]. Объединение углеродных наноструктур разной размерности (1D нанотрубки и 2D графена) открывает широкие возможности для получения наноматериалов с улучшенными свойствами и последующего их применения при разработке электронных устройств следующего поколения [2]. С позиции применения в электронике для формирования гибридных графен-нанотрубных структур предпочтительнее использовать именно одностенные УНТ (ОУНТ), поскольку по сравнению с многостенными УНТ (МУНТ) они обладают лучшими свойствами, в том числе более высокой удельной поверхностью, более низкой плотностью дефектов и настраиваемыми электронными характеристиками в соответствии с хиральностью нанотрубок [3]. В настоящее время остаются малоизученными вопросы управления электрофизическими свойствами гибридных структур графен-ОУНТ за счет выбора определенных топологических параметров нанотрубки и графена, а также их взаимной ориентации в составе гибрида. В данной работе проводится исследование *in silico* электронного строения и электрических характеристик гибридных пленок графен-ОУНТ различной топологии с целью установления закономерностей влияния особенностей атомного строения на электропроводные свойства вышеназванных пленок.

Расчеты в рамках данного исследования проводились с использованием теории функционала плотности в приближении сильной связи DFTB в программном пакете квантово-механического моделирования DFTB+ [4]. Рассматривались структурные конфигурации гибридной пленки графен-ОУНТ, различающиеся типом ОУНТ и взаимной ориентацией ОУНТ и графена. Для построения кристаллических супер-ячеек гибридных пленок графен-ОУНТ были выбраны ОУНТ с индексами хиральности (5,5), (6,0), (16,0), (12,6) и бислойный графен с типами упаковки слоев AA и AB. Равновесные конфигурации супер-ячеек рассматриваемых топологических типов гибридных пленок графен-ОУНТ изображены на рис. 1. Супер-ячейка первого топологического типа (V1) гибридной пленки графен-ОУНТ (рис. 1, а) образована бислойным графеном с типом упаковки слоев AA и ОУНТ (5,5), которая была ориентирована вдоль направления “armchair” гексагональной решетки графена (вдоль оси Y). Супер-ячейка второго топологического типа (V2) образована бислойным графеном с типом упаковки слоев AA и ОУНТ (16,0), которая была ориентирована вдоль направления “armchair” гексагональной решетки графена (рис. 1, б). Супер-ячейка третьего топологического типа (V3) образована бислойным графеном с типом упаковки

слоев АВ (смещение слоев вдоль оси  $Y$  на величину  $0.6 \text{ \AA}$ ) и ОУНТ (12,6), которая располагась под ним (рис. 1, в). Супер-ячейка четвертого топологического типа (V4) была образована бислойным графеном с типом упаковки слоев АВ (смещение слоев вдоль оси  $Y$  на величину  $11.6 \text{ \AA}$ ) и двумя слоями ОУНТ (6,0), располагающимися на графене. При этом верхний слой ОУНТ повернут относительно нижнего на угол  $45^\circ$  (рис. 1, г). Расстояние между фрагментам графена и ОУНТ в составе супер-ячейки изменяется в диапазоне  $3\text{-}3.3 \text{ \AA}$  в зависимости от топологического типа гибридной структуры графен-ОУНТ.

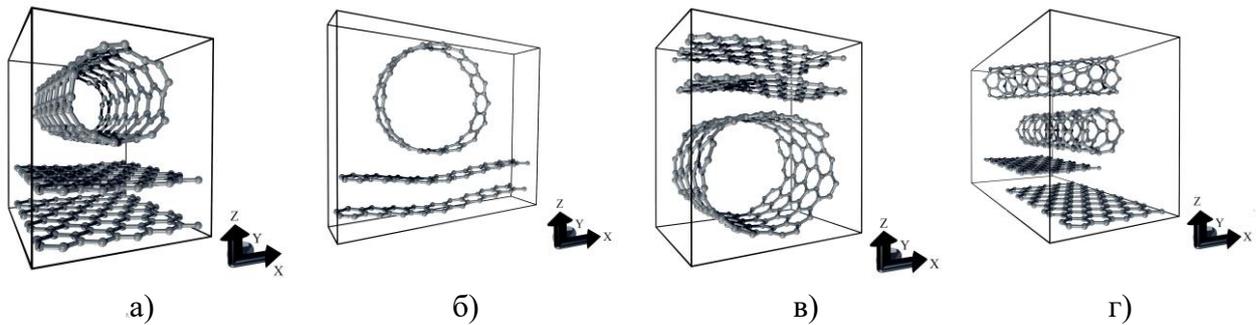
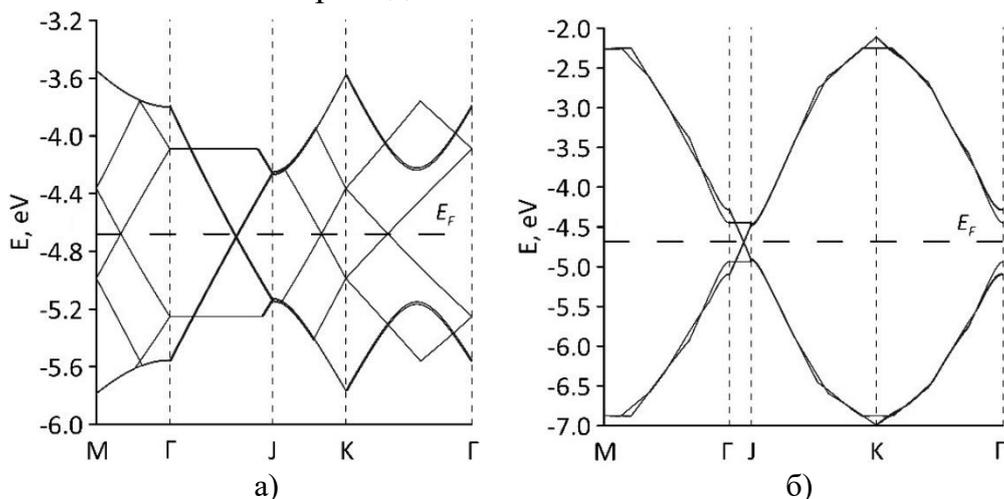


Рис. 1. Равновесные конфигурации супер-ячеек рассматриваемых топологических типов гибридных пленок графен-ОУНТ: (а) тип V1, (б) тип V2, (в) тип V3, (г) тип V4.

Для выявления особенностей электронного строения исследуемых гибридных пленок графен-ОУНТ проводились расчеты зонной структуры и плотности электронных состояний (DOS). Первая зона Бриллюэна для всех топологических типов супер-ячеек гибридов графен-ОУНТ представляла собой прямоугольник. Расчеты проводились в базисе атомных  $p$ -орбиталей. Выявлено, что конфигурации графен-(5,5) (рис. 2, а) и графен-(16,0) (рис. 2, б) обладают металлическим типом проводимости, в то время как конфигурации графен-(12,6) (рис. 2, в) и графен-(6,0) (рис. 2, г) характеризуются наличием энергетической щели между валентной зоной и зоной проводимости.



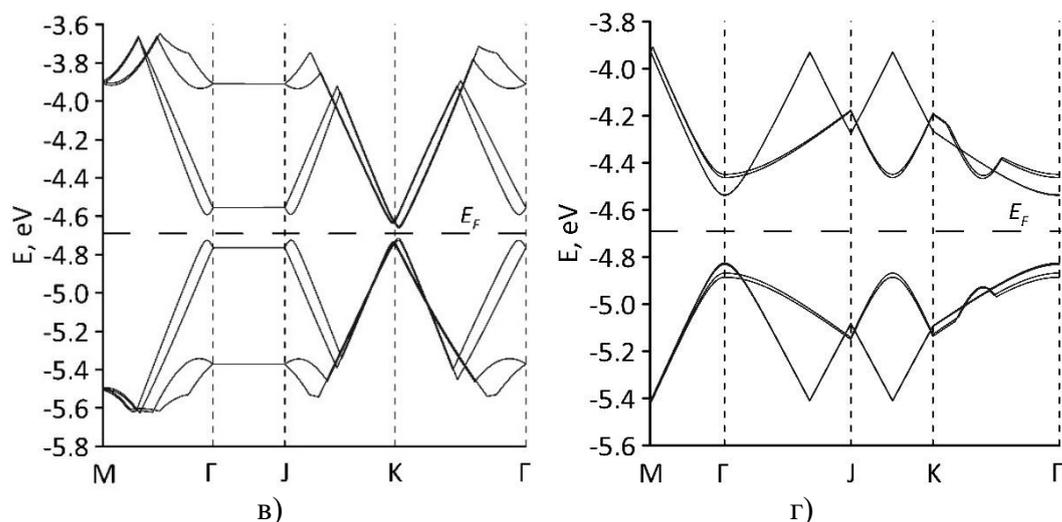


Рис. 2. Зонные структуры рассматриваемых топологических типов гибридных пленок графен-ОУНТ: (а) тип V1, (б) тип V2, (в) тип V3, (г) тип V4.

Электропроводные характеристики исследуемых пленок оценивались по величине электрического сопротивления, рассчитываемого в рамках формализма Ландауэра-Буттикера [5]. По результатам расчета установлено, что для всех рассмотренных топологических типов гибридных пленок графен-ОУНТ характерная анизотропия электропроводности в зависимости от направления токопереноса: вдоль (ось X) или поперек (ось Y) нанотрубки. Наибольшими значениями электропроводности в обоих направления токопереноса характеризуется топологический тип V1.

Таким образом, ключевым фактором в определении типа проводимости и величины электропроводности графен-нанотрубных пленок является взаимная ориентация нанотрубок и графена в составе гибрида.

*Работа выполнена при поддержке гранта РФФ (проект №24-79-10316).*

#### Библиографический список

1. Lv R., Cruz-Silva E., Terrones M. // ACS Nano. 2014. V. 8. Pp. 4061–4069.
2. Du W., Ahmed Z., Wang Q., et al. // 2D Mater. 2019. V. 6. P. 042005.
3. Zhou W., Bai X., Wang E., Xie S. // Adv. Mat. 2009. V. 21. P. 4565–4583.
4. Elstner M., Seifert G. // Philos Trans A Math Phys Eng Sci. 2014. V. 372. P. 20120483.
5. Marconcini P., Macucci M. // Nanomaterials. 2022. V. 12. P. 1087.

## ДИНАМИКА ДВИЖЕНИЯ ДВУХ ВИХРЕЙ В ОГРАНИЧЕННОЙ ОБЛАСТИ.

Д.А. Солодянкин, Е.М. Артемова

ФГБОУ ВО «Удмуртский государственный университет».

E-mail: [dima.solodyankin.97@mail.ru](mailto:dima.solodyankin.97@mail.ru)

Рассмотрена задача движения  $N$  точечных вихрей в ограниченной прямоугольной области. Уравнения движения построены на основе модели движения точечного вихря в бесконечной полосе высоты [1] и теории образов [2] и имеют вид

$$\begin{aligned} \dot{x}_i &= \sum_{j=1, j \neq i}^N \frac{\Gamma_j}{4\pi} \left( \xi(x_i - x_j, y_i + y_j) - \xi(x_i - x_j, y_i - y_j) - \xi(x_i + x_j, y_i + y_j) \right. \\ &\quad \left. + \xi(x_i + x_j, y_i - y_j) \right) + \frac{\Gamma_i}{4\pi} \xi(0, 2y_i) - \frac{\Gamma_i}{4\pi} \xi(2x_i, 2y_i), \\ \dot{y}_i &= - \sum_{j=1, j \neq i}^N \frac{\Gamma_j}{4\pi} \left( \eta(x_i - x_j, y_i + y_j) - \eta(x_i - x_j, y_i - y_j) - \eta(x_i + x_j, y_i + y_j) \right. \\ &\quad \left. + \eta(x_i + x_j, y_i - y_j) \right) - \frac{\Gamma_i}{4\pi} \eta(2x_i, 0) + \frac{\Gamma_i}{4\pi} \eta(2x_i, 2y_i). \end{aligned}$$

где  $(x_i, y_i)$  – координаты  $i$ -го вихря в прямоугольнике,  $\Gamma_i$  – интенсивность  $i$ -го вихря, а  $\xi(x, y)$ ,  $\eta(x, y)$  – функции вида:

$$\xi(x, y) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} \frac{\sin y}{\cosh(x - 2Ln) - \cos y}, \quad \eta(x, y) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} \frac{\sinh(x - 2Ln)}{\cosh(x - 2Ln) - \cos y}.$$

Для случая вихрей равной интенсивности с помощью отображения Пуанкаре показано, что уравнения движения неинтегрируемы. Кроме того, показано существование инвариантного многообразия вида

$$x_1 + x_2 = L, \quad y_1 + y_2 = \pi,$$

где  $L, \pi$  – размеры прямоугольной области.

Для случая вихревой пары (интенсивности вихрей равны по модулю и противоположны по знаку) с помощью отображения Пуанкаре также показана неинтегрируемость уравнений движения. Показано существование двух инвариантных многообразий

$$x_1 - x_2 = 0, \quad y_1 + y_2 = \pi, \quad \text{и} \quad x_1 + x_2 = L, \quad y_1 - y_2 = 0.$$

В случае двух вихрей произвольной интенсивности уравнения движения также неинтегрируемы. В общем случае не удается аналитически обнаружить каких-либо инвариантных многообразий.

*Исследование выполнено в рамках выполнения государственного задания Минобрнауки России (FEWS-2024-0007).*

### Библиографический список

1. Гешев П. И., Ездин Б. С. Движение вихревой пары между параллельными стенками // Прикладная механика и техническая физика. 1983. № 5. С. 62–67.
2. Milne-Thomson L. M. *Theoretical hydrodynamics*. – Courier Corporation, 2013.

## РАЗРАБОТКА ДВУХЛУЧЕВОЙ НИЗКОВОЛЬТНОЙ ЛБВ С ПЛАНАРНОЙ ЗАМЕДЛЯЮЩЕЙ СИСТЕМОЙ НА ДИЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ПОДЛОЖКЕ

**Р.А. Торгашов**

*Саратовский филиал ИРЭ им. В.А. Котельникова РАН*

*E-mail: [torgashovra@gmail.com](mailto:torgashovra@gmail.com)*

Планарные замедляющие системы (ЗС) на диэлектрических подложках обладают высокими значениями замедления, что позволяет использовать их в современных миниатюрных низковольтных вакуумных генераторах и усилителях миллиметрового и субмиллиметрового диапазонов. В частности, большой интерес представляет применение таких структур в усилителях типа лампы бегущей волны (ЛБВ) [1-3]. Однако, как показывают исследования [3], в миллиметровом диапазоне длин волн такие системы не способны обеспечить высоких выходных мощностей в коротковолновой части миллиметрового диапазона. Одним из способов повышения выходной мощности прибора является использование многолучевых электронных пучков (ЭП) [4], что позволяет повысить полный ток пучка и соответственно мощность, сохраняя при этом плотность тока на адекватном уровне.

В данной работе представлены результаты разработки планарной ЗС в виде двух связанных меандров на кварцевой подложке для миниатюрной низковольтной ЛБВ V-диапазона (50-70 ГГц) с двухлучевым ленточным ЭП. Схема ЗС приведена на рис. 1а. Данная ЗС представляет с собой две связанные линии передачи, что привело к тому, что основная мода расщепляется на две, которые обладают симметричной и антисимметричной структурой поля. Моделирование электродинамических характеристик системы показало, что напряжение синхронизма для симметричной моды составляет 4-10 кВ, а для антисимметричной – 4-17 кВ в рабочем диапазоне частот. При этом сопротивление связи симметричной моды оказывается выше и принимает значения 3-24 Ом для двух симметричных ЭП размерами  $650 \times 100$  мкм<sup>2</sup>, которые распространяются в системе на расстоянии 75 мкм от поверхности металлического меандра. Таким образом взаимодействие ЭП более выгодно именно с симметричной модой ЗС. На рис. 2 приведены зависимости сопротивления связи и напряжения синхронизма от частоты. Стоит отметить, что предложенная конструкция является модификацией ЗС в виде одиночного микрополоскового меандра на диэлектрической подложке [4].

Проведено трехмерное РИС моделирование электронно-волнового взаимодействия в ЛБВ с микрополосковой ЗС в виде двух связанных меандров. При этом предполагалось, что полный ток ЭП составляет 200 мА, а напряжение составляет 6 кВ. Полная длина системы составила 83 периода (~20 мм). При входной мощности 10 мВт, что соответствует линейному режиму работы, коэффициент усиления при указанных параметрах пучка может достигать 25 дБ на частоте ~61 ГГц. Исследование при более высоких значениях входной мощности показало, что максимальная выходная мощность достигается вблизи 62 ГГц и составляет 49 Вт при входной мощности 0.5-0.7 Вт.

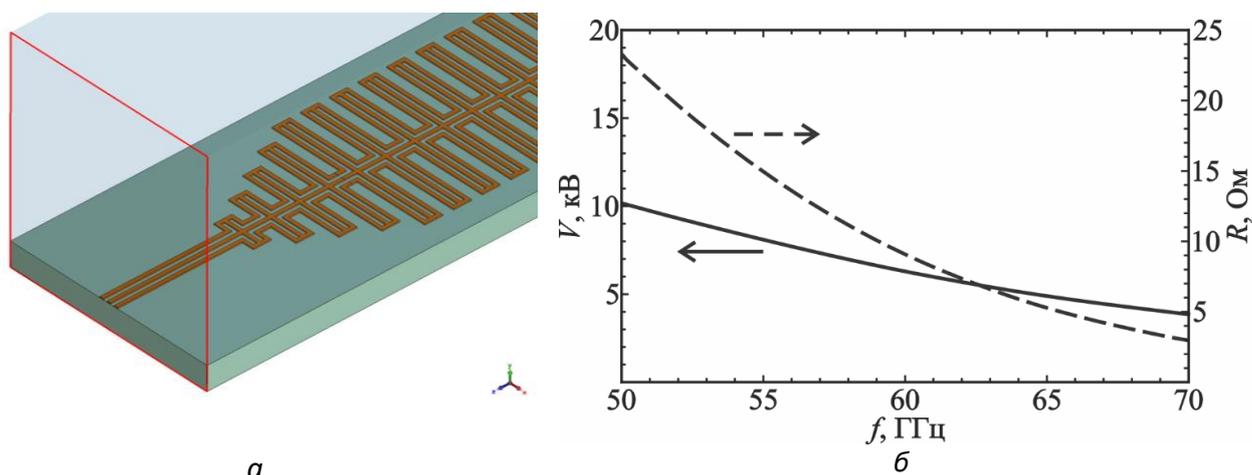


Рис. 1. (а) – схема ЗС в виде связанных меандров на диэлектрической подложке с устройствами согласования, (б) – зависимость напряжения синхронизма и сопротивления связи симметричной моды ЗС от частоты.

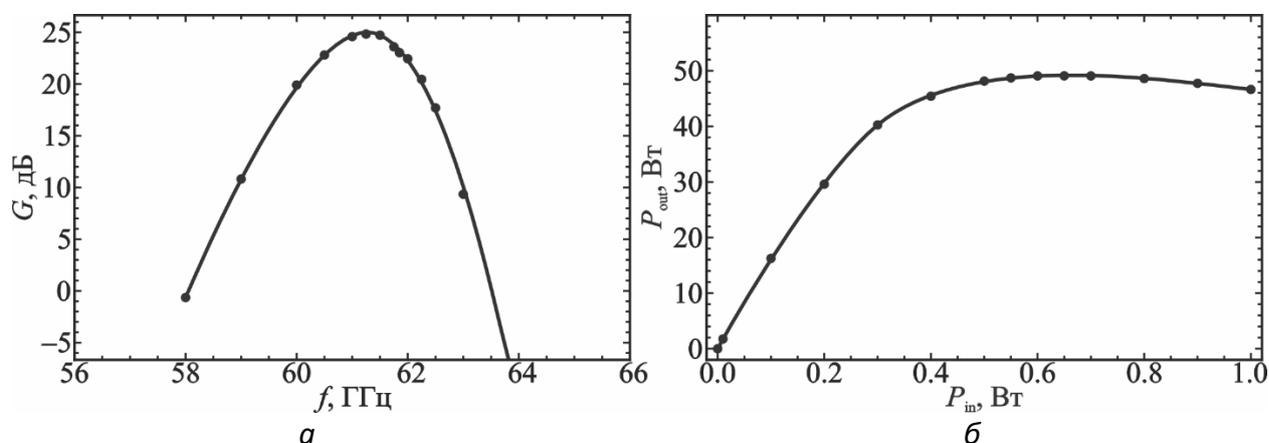


Рис. 2. Результаты моделирования электронно-волнового взаимодействия в ЛБВ: (а) – зависимость коэффициента усиления от частоты при входной мощности 10 мВт, (б) – амплитудная характеристика на частоте 62 ГГц.

Таким образом, предложенная конструкция позволяет увеличить выходную мощность ЛБВ более чем в два раза по сравнению с однолучевой ЛБВ с ЗС в виде одиночного меандра (23 Вт) на тех же частотах при близких значениях напряжения пучка и аналогичной плотности тока. При этом в рассматриваемой двухлучевой ЛБВ число периодов меандра уменьшилось со 125 до 83, а полная длина структуры, соответственно, с 2.25 см до 2 см.

*Работа выполнена в рамках государственного задания Института радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН.*

### Библиографический список

1. Bai N., Feng C., Liu Y., et al. // IEEE Trans. Electron Dev. 2017. V. 64. N 7. P. 2949–2954.
2. Ding C., Wei Y., Li Q., et al. // J. Electromagn. Waves Appl. 2017. V. 31. N 17. P. 1938–1946.
3. Торгашов Р.А., Стародубов А.В., Рожнёв А.Г., Рыскин Н.М. // РЭ. 2022. Т. 67. №10. С. 981–986.
4. Торгашов Р.А., Ножкин Д.А., Стародубов А.В., Рыскин Н.М. // РЭ. 2023. Т. 68. №10. С. 992–997.

## ИССЛЕДОВАНИЕ ГАЗОВОЙ ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТИ АЛМАЗОГРАФИТОВЫХ ПЛЕНОЧНЫХ СТРУКТУР К ПАРАМ АЦЕТОНА

**Н.А. Трунилин<sup>2</sup>, Р.К. Яфаров<sup>1</sup>**

<sup>1</sup>*Саратовский филиал ИРЭ им. В.А. Котельникова РАН,*

<sup>2</sup>*Саратовский национальный исследовательский государственный университет им.*

*Н.Г. Чернышевского*

*E-mail: pirpc@yandex.ru*

Одним из важнейших факторов, обеспечивающих адаптацию современного общества к изменению внешней среды, является своевременная и достоверная информация о ее текущем состоянии. В настоящее время достигнуты существенные успехи в создании систем анализа состава окружающей среды, созданы системы детектирования многокомпонентных газовых смесей и запахов, включающие полупроводниковые сенсоры, устройства предварительной обработки сигналов, контроля и управления рабочим режимом технологических комплексов, которые могут быть сформированы с использованием высоких технологий микро- и наноэлектроники [1-4].

Газовые сенсоры, созданные на основе широкозонных металлооксидных материалов (включая диоксид олова) позволяют детектировать широкий спектр газов органической и неорганической природы и имеют ряд неоспоримых достоинств. Однако круг материалов, которые используются для их получения, по ряду причин, весьма ограничен и экологически небезвреден, как для человека, так и окружающей среды. В связи с этим актуальным является разработка новых материалов и структур, обладающих газочувствительными свойствами и конкурентоспособными методами их получения и эксплуатации.

Цель работы – исследование чувствительности сенсоров на основе алмазографитовых пленочных структур к парам ацетона в широком диапазоне режимов детектирования.

Зависимости от температуры откликов сенсорного материала к парам ацетона рис. 1, рассчитаны по формуле:

$$S = \frac{\rho_{\text{сух}} - \rho_{\text{ацет}}}{\rho_{\text{ацет}}} \times 100 \%,$$

Где  $\rho_{\text{ацет}}$  – сопротивление материала в парах ацетона, а  $\rho_{\text{сух}}$  – сопротивление в сухом воздухе.

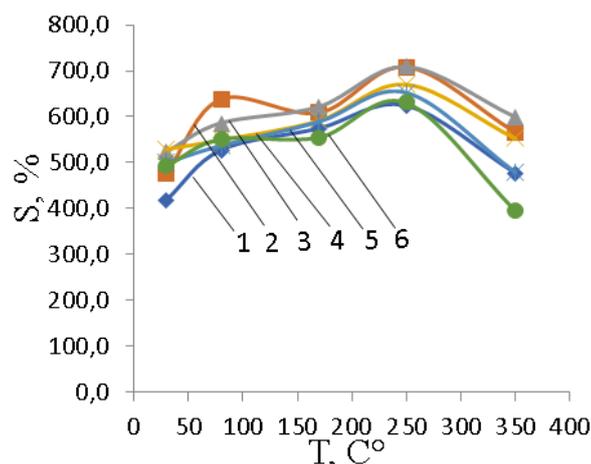


Рис 1. Зависимости отклика алмазграфитовой пленочной структуры к парам ацетона от температуры детектирования при различных напряжениях инъекции, В: 1–10, 2 – 20, 3–30, 4–40, 5–50, 6– 60.

Согласно полученным экспериментальным данным, при воздействии паров ацетона отклик алмазграфитовой структуры к парам ацетона в зависимости от температуры детектирования и напряжения инъекции по отношению к сухому воздуху увеличивается в 4-8 раз.

Установленные закономерности влияния напряжения инъекции и температуры на удельные поверхностные сопротивления алмазграфитовых пленочных структур позволяют оптимизировать параметры режимов их детектирования при различных условиях эксплуатации.

В отличие от металлооксидных сенсоров, преимуществом алмазграфитовых пленочных структур в качестве газочувствительных элементов является их экологическая чистота, высокая газочувствительность в широком диапазоне режимов детектирования, простота и дешевизна их получения с использованием современного технологического оборудования микроэлектроники. Высокая газовая чувствительность алмазграфитовых пленочных структур при низких (комнатных) температурах позволит использовать их не только для создания систем анализа состава окружающей среды в различных технологических комплексах промышленного назначения, но и в новой отрасли, а именно медицине, например, в качестве автономных газовых сенсоров при детектировании летучих соединений в выдыхаемом воздухе человека, которые являются продуктами процессов метаболизма, как при заболеваниях в повседневной жизни, так и в тренировочных процессах спортсменов.

#### Библиографический список

1. Chizhov, A., Rumyantseva, M., Gaskov, A. Light Activation of Nanocrystalline Metal Oxides for Gas Sensing: Principles, Achievements, Challenges // *Nanomaterials*. 2021. Vol.11. P. 892.
2. Marikutsa, A.; Rumyantseva, M.; Konstantinova, E.A.; Gaskov, A. The Key Role of Active Sites in the Development of Selective Metal Oxide Sensor Materials // *Sensors*. 2021. 21, 2554.
3. Jaaniso R., Tan O.K. *Semiconductor Gas Sensors*. Cambridge: Elsevier, 2013. 552 p.
4. Natale C., Ferrari V., Ponzoni A., Sberveglieri G., Ferrari M. // *Sensors and Microsystems*. Heidelberg: Springer, 2014. 439 p.

**ВОЗБУЖДЕНИЕ ПЛАЗМОННЫХ МОД, ЛОКАЛИЗОВАННЫХ НА КРАЮ ОГРАНИЧЕННОГО ГРАФЕНОВОГО ПРЯМОУГОЛЬНИКА****К.В. Машинский<sup>1</sup>, В.В. Попов<sup>1</sup>, Д.В. Фатеев<sup>1,2</sup>**<sup>1</sup>*Саратовский филиал ИРЭ им. В.А. Котельникова РАН.*<sup>2</sup>*Саратовский национальный исследовательский государственный университет им. Н.Г. Чернышевского**E-mail: [konstantin-m92@yandex.ru](mailto:konstantin-m92@yandex.ru)*

Исследование графеновых плазмонных структур – перспективное направление двумерной терагерцовой (ТГц) оптоэлектроники [1]. К преимуществам таких структур относятся локализация поля на длинах, меньших длины электромагнитной волны [2] и нелинейные свойства, полезные для детектирования [3] и усиления [4] ТГц волн.

В данной работе рассмотрено возбуждение плазмонов в ограниченном графеновом прямоугольнике со сторонами  $w$  (в направлении оси  $OX$ ) и  $l$  (в направлении оси  $OY$ ). Электромагнитная волна ТГц диапазона частот, линейно поляризованная в плоскости  $XOZ$ , нормально падает на плоскость  $XOY$ , содержащую графеновый прямоугольник и разделяющую два полупространства с диэлектрическими проницаемостями  $\varepsilon_1 = 1$  и  $\varepsilon_2 = 4$ .

Исследована зависимость спектра затухания плазмонных резонансов от ширины графенового прямоугольника  $w$  при длине  $l = 130$  мкм (рис. 1, а). На кривых виден ряд резонансов, смещающихся по оси частоты с ростом ширины прямоугольника. Для более наглядного наблюдения за смещением построен график зависимости круговой частоты плазмонных резонансов от ширины графенового прямоугольника (рис. 1, б). На этом графике можно наблюдать обратную зависимость круговой частоты от ширины прямоугольника у трех резонансов, являющихся краевыми, в отличие от зависимости поверхностного резонанса [5], резонанса Волкова-Феттера [6] и резонанса со слабым дипольным моментом вдоль оси  $Y$  и сильным дипольным моментом вдоль оси  $X$  [5].

Для ряда резонансов на кривой, соответствующей ширине прямоугольника  $w = 0.5$  мкм (рис. 1, а), построены распределения зарядов на краю плоскости графенового прямоугольника (рис. 1, в-ж). Как видно на рисунке 1, в, волна колеблется, преимущественно, вдоль направления оси  $OX$ . Заряды на противоположных краях, вдоль оси  $OX$ , имеют разные знаки, а волна имеет один узел, что говорит о фундаментальном плазмонном резонансе с большим дипольным моментом, возбуждаемым падающей волной, поляризованной вдоль направления оси  $OX$ .

На рисунке 1, г, помимо фундаментального плазмонного резонанса, можно видеть эффект, локализованный вдоль края прямоугольника в направлении оси  $OX$  и имеющий такую же зависимость круговой частоты от ширины прямоугольника, что и фундаментальный плазмонный резонанс. Значит, это действительно резонанс Волкова-Феттера.

Волна, представленная на рисунке 1, д, колеблется как вдоль оси  $OX$ , так и вдоль оси  $OY$ , и имеет эффект, локализованный вдоль края прямоугольника в

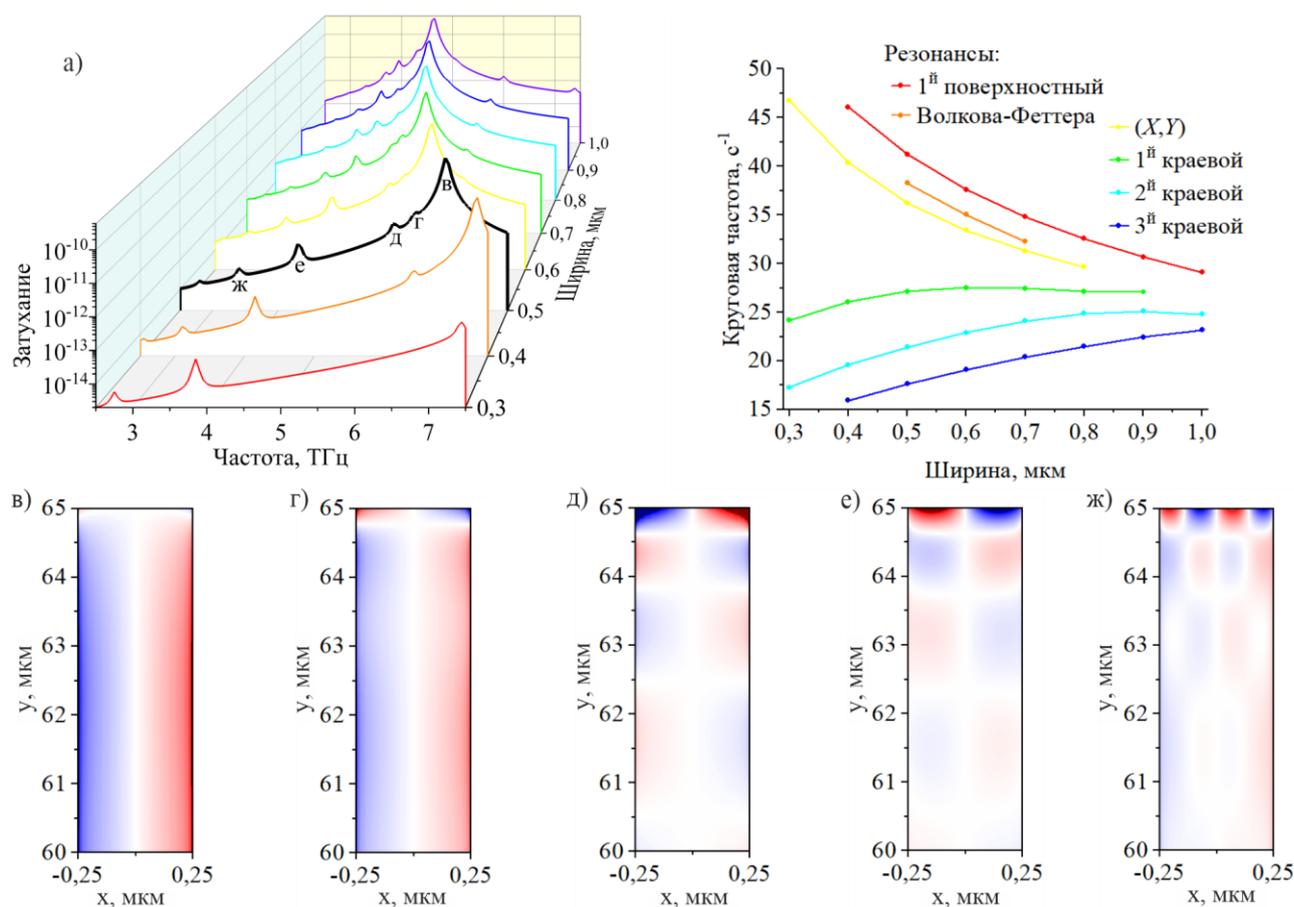


Рис. 1. Спектр затухания плазмонных резонансов в зависимости от ширины графенового прямоугольника (а). Зависимость круговой частоты плазмонных резонансов от ширины графенового прямоугольника (б). Распределение плотности заряда в графеновом прямоугольнике шириной  $w = 0.5$  мкм для резонансов на частотах  $f = 6.55$  ТГц (в),  $f = 6.09$  ТГц (г),  $f = 5.77$  ТГц (д),  $f = 4.32$  ТГц (е),  $f = 3.41$  ТГц (ж).

направлении оси  $OX$ . Это резонанс со слабым дипольным моментом  $y$ -направленной компоненты плазменной волны в случае  $x$ -поляризованной падающей волны, гибридный с резонансом Волкова-Феттера.

На рисунках 1, е, ж помимо фундаментального (рис. 1, е) и второго (рис. 1, ж) плазмонных резонансов, можно видеть эффект, локализованный вдоль края прямоугольника в направлении оси  $OX$  и имеющий обратную зависимость круговой частоты от ширины прямоугольника, в отличие от фундаментального плазмонного резонанса. Значит, это действительно первый (рис. 1, е) и второй (рис. 1, ж) краевые плазмонные резонансы.

*Работа поддержана грантом РФФ № 22-19-00611.*

### Библиографический список

1. Cox J.D., Garcia De Abajo F.J. // *Acc. Chem. Res.* 2019. V. 52 Pp. 2536-2547.
2. Zheng Z.B., Li J.T., Ma T., Fang H.L., et al. // *Light: Sci. Appl.* 2017. V. 6. P. e17057.
3. Fateev, D.V., Mashinsky K.V., Popov V.V. // *App. Phys. Lett.* 2017. V. 110. P. 061106.
4. Moiseenko I.M. Popov V.V., Fateev D.V. // *Phys. Rev. B.* 2021. V. 103. P. 195430.
5. Mashinsky K.V., Popov V.V., Fateev D.V. // *Sci. Rep.* 2024. V. 14(1). P. 7546.
6. Volkov V.A., Zagorodnev I. // *Low Temp. Phys.* 2008. V. 35(1). Pp. 2-5.

## БИОМАРКЕРЫ ИШЕМИЧЕСКОЙ БОЛЕЗНИ СЕРДЦА, ОСНОВАННЫЕ НА АНАЛИЗЕ ФОРМЫ ST-СЕКМЕНТА ЭЛЕКТРОКАРДИОГРАММЫ

А.Р. Шабаета

Саратовский национальный исследовательский государственный университет  
им. Н.Г. Чернышевского

E-mail: [alinka\\_shabaeva@mail.ru](mailto:alinka_shabaeva@mail.ru)

Применение методов нелинейной динамики к анализу колебательных биофизических систем привлекает значительное внимание исследователей. В настоящее время приложения нелинейной динамики к анализу элементов связанных биофизических систем показали свою эффективность при решении множества задач медицинской диагностики: выявления патологий сердечно-сосудистой системы у пациентов [1, 2] и здоровых новорожденных [3], диагностика когнитивного состояния [4, 5], исследование мозга [6], диагностика стадий сна [7, 8] и биологического возраста [9].

Ишемическая болезнь сердца (ИБС) является одной из основных причин смертности во всем мире [10]. Данная работа направлена на применение методов нелинейной динамики для скрининга ишемической болезни сердца (ИБС) на основе анализа формы ST-сегмента электрокардиограммы. В работах [11, 12] показано, что одним из первых биомаркеров развития ИБС при анализе электрокардиограммы (ЭКГ) является изменение формы ST-сегмента. Т-зубец ЭКГ здоровых добровольцев ассиметричный и демонстрирует более медленный нарастающий фронт и более крутой спадающий фронт (рис. 1а). При развитии ИБС Т-зубец становится симметричным (рис. 1б). Поэтому изменение скорости нарастания ST-сегмента ЭКГ и симметричности Т-зубца является маркером начала развития ИБС. Однако задача диагностики ИБС на ранних стадиях и методов контроля эффективности лечения не решена.

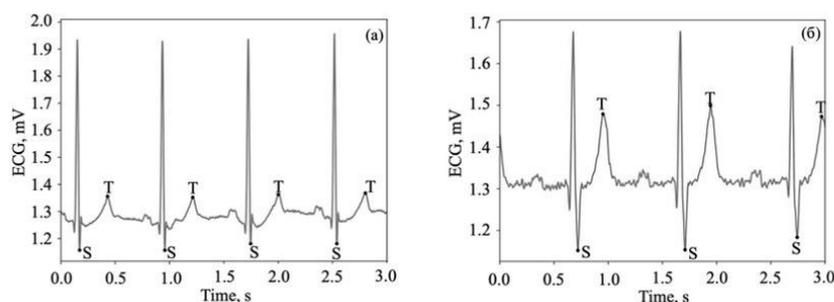


Рис. 1. (а) ЭКГ здорового добровольца. (б) ЭКГ пациента с ИБС. Точками отмечены S- и Т-зубцы.

В работе исследуется форма Т-зубца ЭКГ 30 здоровых добровольцев без признаков сердечной патологии в возрасте  $21 \pm 3$  лет (среднее  $\pm$  стандартное отклонение) и 30 пациентов в возрасте  $53 \pm 10$  лет с впервые диагностированной ИБС. Положение испытуемых лежа. Дыхание спонтанное. Состояние бодрствования. Частота дискретизации ЭКГ 250 Гц.

С помощью автоматической процедуры детектируется S- и Т-зубец ЭКГ (рис. 1) [13]. Для анализа формы ST-сегмента ЭКГ рассчитываются два равной половине длительности ST-сегмента осуществляется линейная аппроксимация

нарастающего и спадающего фронтов Т-зубца и вычисляются коэффициенты:  $a_1$  - скорость изменения ЭКГ нарастающего фронта Т-зубца (mV/s) (рис. 2а, сплошная линия),  $a_2$  - скорость изменения ЭКГ на спадающем фронте Т-зубца (mV/s) (рис. 2а, пунктир). В результате рассчитывается индекс отношения  $k=|a_1|/|a_2|$  и индекс разности  $r=|a_1|-|a_2|$ .

На рисунке 2б представлена диаграмма рассеивания индексов  $k$  и  $r$  для здоровых добровольцев (рис. 2б, треугольники) и пациентов с ИБС (рис. 2б, кружочки). Индекс  $k$  принимает более высокие значения для пациентов с ИБС, чем здоровых. Значение  $k$  для здоровых добровольцев составляет  $0.49 \pm 0.11$ , пациентов с ИБС –  $0.73 \pm 0.13$ . Индекс  $r$  принимает более высокие значения для здоровых добровольцев, чем пациентов с ИБС (рис. 2б). Значения  $r$  для здоровых добровольцев составляет  $7.93 \pm 2.94$ , пациентов с ИБС –  $1.49 \pm 1.29$ . Метод кластеризации к-средних предложенных количественных индексов позволил разделить здоровых добровольцев и пациентов с ИБС с чувствительностью 1.00, специфичностью – 0.78, F-score – 0.87.

В данной работе были предложены количественные индексы, характеризующие форму ST-сегмента ЭКГ. Предложенные индексы были протестированы при анализе ЭКГ здоровых добровольцев и пациентов с впервые выявленной ИБС. Полученные результаты свидетельствуют о перспективности предложенных индексов для решения задачи диагностики пациентов с ИБС.

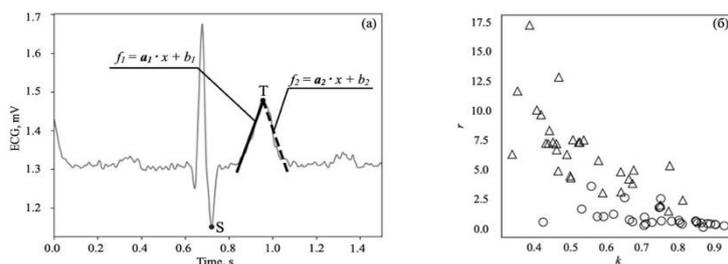


Рис. 2. (а) Иллюстрация алгоритма расчета индексов  $k$ ,  $r$  формы ST-сегмента ЭКГ. Тонкая линия ЭКГ длительностью 1.5 секунд. Точками отмечены зубцы S и T. Сплошная линия - линейная аппроксимация нарастающего фронта Т-зубца. Пунктир - линейная аппроксимация спадающего фронта Т-зубца. (б) Диаграмма рассеивания индексов  $k$  и  $r$  для всей экспериментальной выборки. Треугольники - здоровые добровольцы. Кружочки - пациенты с ИБС.

*Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда, проект № 23-12-00241.*

### Библиографический список

1. Shvartz V.A., Karavaev A.S., Borovkova E.I., Mironov S.A., Ponomarenko V.I., Prokhorov M.D., Ishbulatov Yu.M., Lapsheva E.E., Gridnev V.I., Kiselev A.R. // Russian Open Medical Journal. 2016. Т. 5. № 2. С. 203.
2. Киселев А.Р., Гриднев В.И., Караваев А.С., Прохоров М.Д., Пономаренко В.И., Посенкова О.М., Боровкова Е.И., Безручко Б.П. // Функциональная диагностика. 2011. № 4. С. 28-35.

3. Панина О.С., Киселев А.Р., Боровкова Е.И., Черненко Ю.В., Сказкина В.В., Гриднев В.И., Муреева Е.Н., Караваяев А.С. // Российский вестник перинатологии и педиатрии. 2018. Т. 63. № 4. С. 52-57.
4. Prokhorov M.D., Borovkova E.I., Hramkov A.N., Dubinkina E.S., Ponomarenko V.I., Ishbulatov Yu.M., Kurbako A.V., Karavaev A.S. // Applied Sciences (Switzerland). 2023. Т. 13. № 14. С. 8390.
5. Borovkova E.I., Hramkov A.N., Dubinkina E.S., Ponomarenko V.I., Bezruchko B.P., Ishbulatov Y.M., Kurbako A.V., Karavaev A.S., Prokhorov M.D. // The European Physical Journal. Special Topics. 2023. Т. 232. № 5. С. 625-633.
6. Караваяев А.С., Руннова А.Е., Боровкова Е.И., Ишбулатов Ю.М., Хорев В.С., Киселев А.Р., Журавлев М.О., Пономаренко В.И., Прохоров М.Д., Безручко Б.П., Короновский А.А. // Саратовский научно-медицинский журнал. 2016. Т. 12. № 4. С. 541-548.
7. Borovkova E.I., Prokhorov M.D., Kiselev A.R., Hramkov A.N., Mironov S.A., Agaltsov M.V., Ponomarenko V.I., Karavaev A.S., Drapkina O.M., Penzel T. // Frontiers in Network Physiology. 2022. Т. 2. С. 942700.
8. Karavaev A.S., Borovkova E.I., Runnova A.E., Gridnev V.I., Kiselev A.R., Skazkina V.V., Prokhorov M.D., Hramkov A.N., Penzel T., Ponomarenko V.I., Kuznetsov N.V., Chechurin L.S. // Frontiers in Neuroscience. 2022. Т. 15. С. 791510.
9. Ponomarenko V.I., Karavaev A.S., Prokhorov M.D., Borovkova E.I., Hramkov A.N., Penzel T., Kiselev A.R. // Chaos (Woodbury, N.Y.). 2021. Т. 31. № 7. С. 073105
10. Wu G., Ji Q., Huang H., Zhu X. // Medicine. 2021. V. 100(37). Pp. e27253.
11. Jeong G.Y., Yu K.H., Yoon M.J., Inooka E. // Medical engineering & physics. 2010. V. 32(9). Pp. 1025-31.
12. Kharel H., Pokhrel N.B., Pokhrel B., Chapagain P., Poudel C.M. // Cureus. 2020. V. 12(6). Pp. e8580.
13. Chupov A.A., Zhdanov A.E., Rakhmatullov F.K., Rakhmatullov R.F., Dolganov A.Yu. // Ural Radio Engineering Journal. 2021. V. 5(4). Pp. 337-352.

## СПИНОВАЯ НАКАЧКА БЕГУЩИМИ ПМСВ В СТРУКТУРЕ ЖИГ/РТ НА ОСНОВЕ ПЛЕНКИ ЖИГ С ПОНИЖЕННОЙ НАМАГНИЧЕННОСТЬЮ

М.Е. Селезнев<sup>1,2</sup>, Ю.В. Никулин<sup>1,2</sup>, С.Л. Высоцкий<sup>1,2</sup>, Ю.В. Хивинцев<sup>1,2</sup>,  
А.В. Кожевников<sup>1</sup>, В.К. Сахаров<sup>1,2</sup>, Ю.А. Филимонов<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>СФирЭ им. В.А. Котельникова РАН.

<sup>2</sup>СНУГУ им. Н.Г. Чернышевского

E-mail: [mixanich94@mail.ru](mailto:mixanich94@mail.ru)

Исследование спиновой накачки с помощью обратного спинового эффекта Холла (ОСЭХ) в структурах на основе пленок железо-иттриевого граната (ЖИГ) и платины перспективно с точки зрения построения энергоэффективной элементной базы на принципах магнотронной спинтроники [1,2]. Как правило, в экспериментах используются эпитаксиальные пленки ЖИГ с намагниченностью насыщения  $4\pi M_1 = 1750$  Гс. В данной работе представлены результаты, полученные для структуры ЖИГ/Pt на основе пленки легированного ЖИГ с  $4\pi M_2 = 550$  Гс и толщиной 26 мкм. Интерес к пленкам ЖИГ с пониженной намагниченностью заключается в возможности проведения измерений при меньших значениях магнитного поля  $H$  и частоты поверхностных магнитостатических волн (ПМСВ)  $f$ , не попадая в область трехмагнотронных распадов (ЗМ), которые могут существенно ограничивать мощность ПМСВ. При создании структур легированный ЖИГ/Pt использовалась подложка с плоскостными размерами  $5 \times 10$  мм, на поверхности которой с помощью технологий вакуумного напыления и фотолитографии формировалась полоска из платины шириной 25 мкм, толщиной 4 нм, длиной 4 мм ( $R=8$  кОм), ориентированная вдоль длинной стороны волновода. Внешнее постоянное магнитное поле  $H$  прикладывалось касательно к поверхности структуры перпендикулярно длинной стороне волновода, что соответствовало геометрии ПМСВ [3], которые возбуждались и принимались микрополосковыми антеннами шириной 40 мкм. Расстояние между антеннами равнялось 7 мм. Регистрировались частотные зависимости коэффициента передачи макета  $S_{12}(f)$  и генерируемой на полоске платины ЭДС  $U$ .

На рисунке 1 (а) приведены рассчитанные зависимости от величины поля  $H$  верхних  $f_s^{M_1, M_2} = \gamma(4\pi M_{1,2} + H)$  и нижних  $f_0^{M_1, M_2} = \gamma\sqrt{H(H + 4\pi M_{1,2})}$  границ частот существования ПМСВ [3] для ЖИГ с намагниченностями насыщения  $4\pi M_1 = 1750$  Гс,  $4\pi M_2 = 550$  Гс и  $\gamma = 2.8 \frac{\text{МГц}}{\text{Э}}$ . Видно, что в диапазоне 300 – 500 Э, для пленки ЖИГ с  $4\pi M_1$  вся полоса частот  $f$  существования ПМСВ подвержена ЗМ распадам ( $f > f^{\text{ЗМ}} = 2\gamma H$ ). Чувствительность  $S = U/P_{\text{пмсв}}$ , где  $P_{\text{пмсв}}$  – мощность ПМСВ, в этом случае не превышает  $10^{-4}$  В/Вт [4]. В то же время, для пленки с  $4\pi M_2$  ПМСВ в этом интервале полей не подвержена ЗМ распадам ( $f > f^{\text{ЗМ}}$ ), при этом чувствительность  $S$  составляла  $S \sim 10^{-3}$  В/Вт, что по порядку величины сопоставимо со значениями  $S$  для ЖИГ с  $4\pi M_1 = 1750$  Гс.

На рисунке 1 (b-d) приведены частотные зависимости коэффициента передачи сигнала ПМСВ  $S_{12}$  (черные линии) и ЭДС  $U$  (красные линии), измеренные при полях подмагничивания  $H = 330, 220$  и  $190$  Э и входной мощности  $P_{\text{in}} = 10$  дБм. Из рисунков можно видеть, что в эксперименте ЗМ процессы «обрезают» зону

ПМСВ и частотную зависимость ЭДС при  $H < 330$  Э на частотах  $f > f_{3M}$  (на рис. 1 с-d отмечена вертикальной пунктирной линией). Также необходимо отметить, что вид зависимости  $U(f)$  не содержит типичного для структур нелегированный ЖИГ/Pt ярко выраженного максимума ЭДС вблизи низкочастотной границы  $f_0$  области существования ПМСВ. Одной из причин такой зависимости  $U(f)$  может являться неоднородность магнитных параметров легированной пленки ЖИГ по толщине, приводящее к росту гибридизации дипольной ПМСВ с обменными модами структуры [5,6]. При этом из-за высокой эффективности рассеяния электронов на обменных спиновых волнах величина ЭДС на частотах  $f > f_0$  растет.

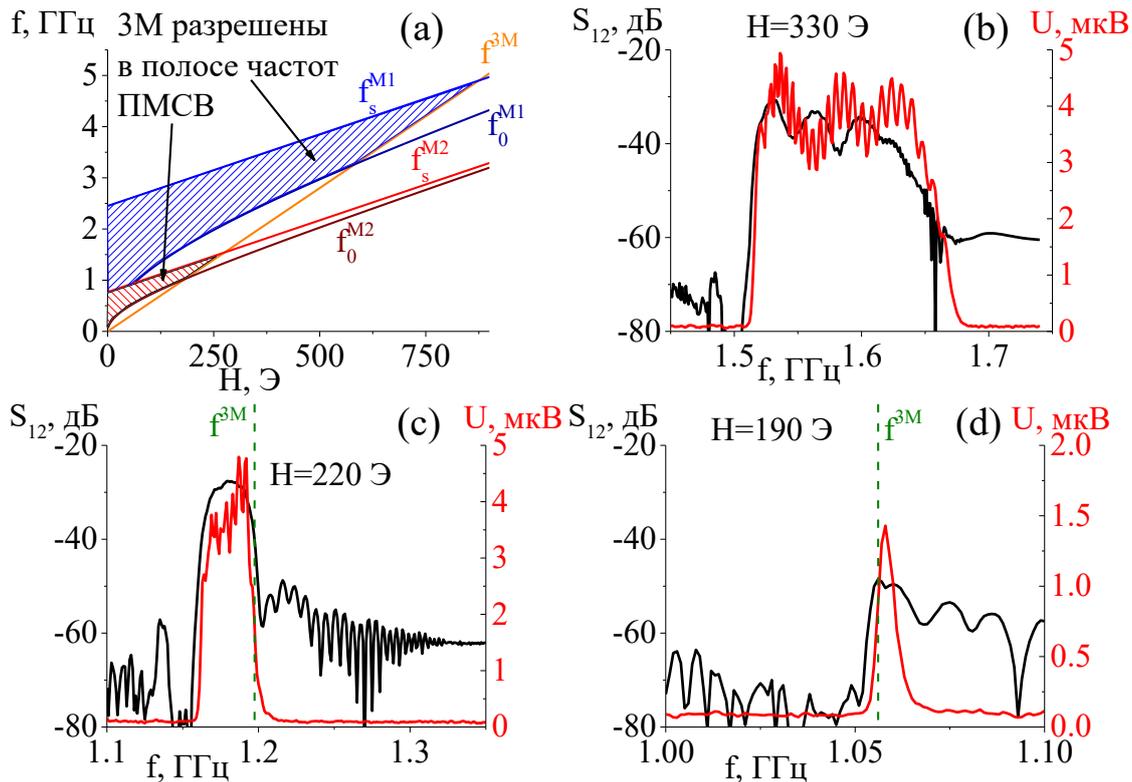


Рис. 1. (a) зависимости от величины поля  $H$  верхних граничных (линии  $f_s^{M1}$ ,  $f_s^{M2}$ ) и нижних граничных (линии  $f_0^{M1}$ ,  $f_0^{M2}$ ) частот ПМСВ для ЖИГ с намагниченностями насыщения  $4\pi M_{1,2} = 1750$  Гс и  $550$  Гс, соответственно, где линия  $f^{3M} = 2\gamma H$ ; (b-d) частотные зависимости коэффициента передачи макета с исследованной структурой  $S_{12}$  (черная линия) и ЭДС (красная линия), измеренные при  $H = 330$  (b),  $220$  (c) и  $190$  (d) Э и входной мощности  $10$  дБм.

Работа поддержана грантом РНФ № 22-19-00500.

### Библиографический список

1. Chumak A.V., Vasyuchka V.I., Serga A.A. et al. // Nature physics. В. 2015. V. 11. P. 453.
2. Hahn C., Klein O., Naletov V.V. et al. // Phys. Rev. B. 2013. V. 87. P. 174417.
3. Гуревич А.Г., Мелков Г.А. Магнитные колебания и волны. Физматлит, М. 1994. 464 с.
4. Селезнев М.Е., Никулин Ю.В., Хивинцев Ю.В. и др. // Известия вузов. ПНД. 2023. Т. 31. С. 225.
5. Зильберман П.Е., Темиряев А.Г., Тихомирова М.П. // УФН. 1995. Т. 165. С. 1219.
6. Сахаров В.К., Хивинцев Ю.В., Дудко Г.М. и др. // ФТТ. 2022. Т. 64. С. 1255.

## ОСОБЕННОСТИ СПЕКТРА СПИНОВЫХ ВОЛН В РЕШЁТКЕ СВЯЗАННЫХ МИКРОПОЛОСОК ИЗ $Y_3Fe_5O_{12}$ С НЕОДНОРОДНЫМ РАСПРЕДЕЛЕНИЕМ НАМАГНИЧЕННОСТИ ПО ТОЛЩИНЕ

В.К. Сахаров<sup>1,2</sup>, Ю.В. Хивинцев<sup>1,2</sup>, Ю.А. Филимонов<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>СФИРЭ им. В.А. Котельникова РАН.

<sup>2</sup>СГУ им. Н.Г. Чернышевского

E-mail: [valentin@sakharov.infu](mailto:valentin@sakharov.infu)

Решётки микрополосок, связанных магнитным дипольным взаимодействием, важны с точки зрения возможности управления распространением в них пучков спиновых волн (СВ). Это может достигаться за счёт образования запрещённых зон в спектре, если волноводы формируют магнетонные кристаллы или сами являются магнетонными кристаллами [1], эффектов дискретной дифракции [2,3], преобразования и расщепления мод СВ [4] и др. При определённой конфигурации микрополосок оказывается возможным распространение СВ в решётках из них без внешнего магнитного поля [5], что важно с точки зрения компактности создаваемых на их основе устройств, не требующих внешней магнитной системы.

В данной работе с помощью микромагнитного моделирования в программе ООММФ [6] исследуется возможность дополнительной подстройки дисперсионных свойств СВ в связанных волноводах за счёт задания профиля намагниченности.

Рассматривались решётки микрополосок из железо-иттриевого граната (ЖИГ) толщиной 1 мкм, с периодом  $P=1.5$  мкм и 7.5 мкм. Расстояние  $w$  между микрополосками варьировалось, тем самым, изменялась связь между ними. Внешнее поле в 320 Э прикладывалось вдоль микрополосок (оси  $y$ ), тогда как распространение волны рассматривалось перпендикулярно им (вдоль оси  $x$ ) в плоскости плёнки, что соответствовало конфигурации поверхностной магнито-статической волны (ПМСВ). Исследовалось прохождение ПМСВ в решётках микрополосок с линейным изменением намагниченности  $4\pi M$  по толщине от 1550 Гс на нижней границе до 1950 Гс – на верхней. Анализировались дисперсионные характеристики и АЧХ коэффициента передачи  $S_{21}(f)$ , которые получались из пространственно-временного изменения  $4\pi M$  по процедуре, аналогичной [7]. При этом входная антенна располагалась на центральной микрополоске, а выходные антенны – на микрополосках на расстоянии в 150 мкм по обе стороны от центра.

Для  $P=7.5$  мкм при  $w=50-750$  нм в спектрах ПМСВ в исследуемых структурах присутствует область однонаправленного распространения (обозначена «I» на рис. 1b) и широкие брэгговские резонансы (обозначены «\*» на рис. 1b). При  $w=1250$  нм область однонаправленного распространения в  $S_{12}(f)$  исчезает. В целом, с увеличением  $w$  зона прохождения сдвигается в область больших частот за счёт увеличения соответствующего размагничивающего фактора и уменьшается по ширине (сравните рис. 1a,b и рис. 1e,f).

В случае  $P=1.5$  мкм наблюдается похожее поведение области однонаправленного распространения (обозначена «I» на рис. 1d) и сужение зоны прохождения с ростом  $w$ . В спектре нет брэгговских резонансов, однако присутствуют широкие запрещённые зоны (обозначены «0» на рис. 1d), которые связаны с расщеплением дисперсионных характеристик за счёт градиента  $4\pi M$  по толщине. Ещё одной особенностью является формирование веток дисперсии с отрицательной групповой скоростью (обратных веток) при  $w > 750$  нм – см. рис. 1g.

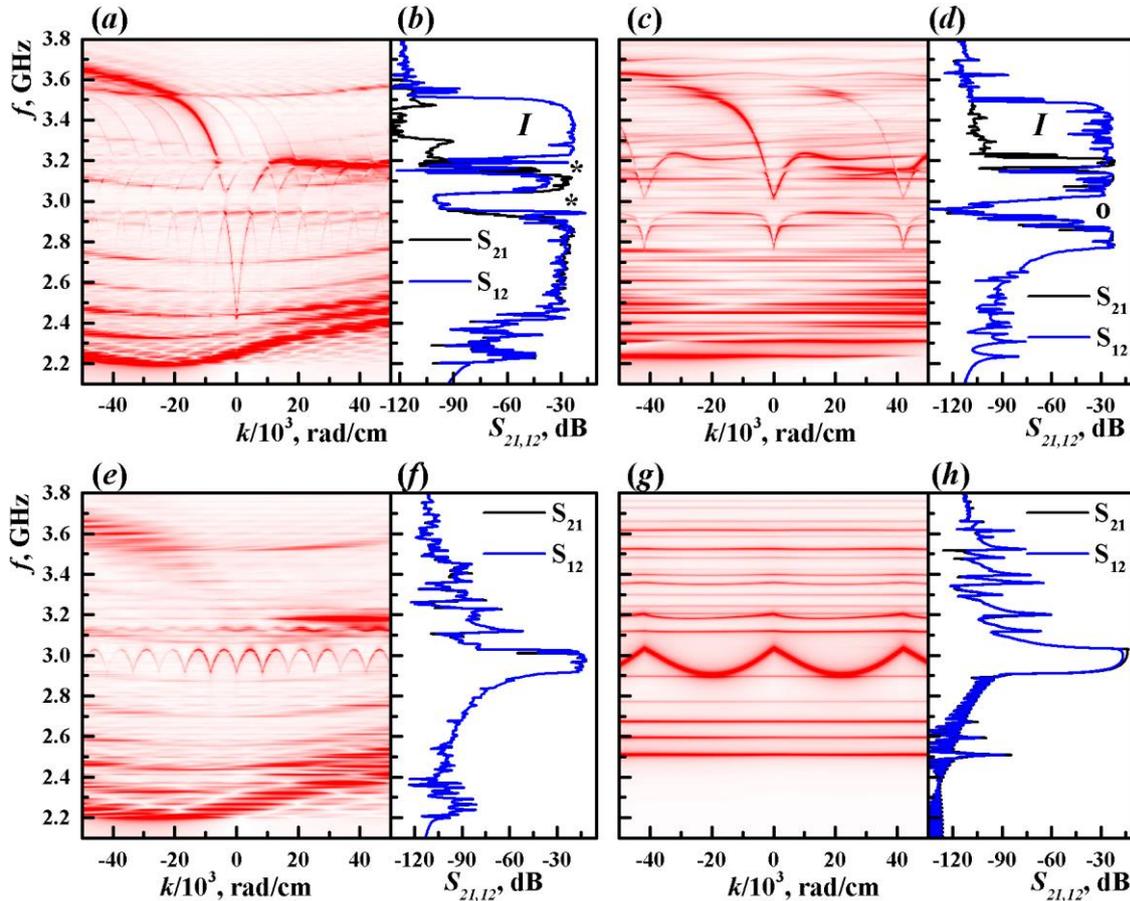


Рис. 1. Дисперсии (а, с, е, г) и АЧХ коэффициента передач (b, d, f, h) для исследуемых структур с  $P=7.5$  мкм (а, b, е, f) и  $P=1.5$  мкм (с, d, г, h) при  $w=0.25$  мкм (а-д);  $w=3.75$  мкм (е, f);  $w=1.25$  мкм (г, h);

Работа выполнена в рамках государственного задания СФИРЭ им. В.А. Котельникова РАН.

### Библиографический список

1. Gubbiotti G., Tacchi S., Madami M. et al. // J. Phys. D. 2010. V. 43. P. 264003.
2. Sadovnikov A.S., Beginin E.N., Sharaevsky Y.P., Nikitov S.A. // PM'14. 2014. Poznan, Poland. P. 143.
3. Sakharov V.K., Beginin E.N., Khivintsev Y.V. et al., // Appl. Phys. Lett. 2020. V. 117. P. 022403.
4. Wang Q., Pirro P., Verba R. et al. // Sci. Adv. 2018. V. 4(1). P. e1701517.
5. Haldar A., Kumar D., Adeyeye A. // Nat. Nanotechnology. 2016. V. 11. Pp. 437-444.
6. Donahue M.J., Porter D.G. // Interagency Report NISTIR. 1999. P. 6376.
7. Dvornik M., Kuchko A.N., Kruglyak V.V. // J. Appl. Phys. 2011. V. 109. P. 07D350.

## ОСОБЕННОСТИ СПЕКТРА ПОВЕРХНОСТНОЙ МАГНИТОСТАТИЧЕСКОЙ ВОЛНЫ, РАСПРОСТРАНЯЮЩЕЙСЯ В СУБВОЛНОВЫХ СТРУКТУРАХ ИЗ ПЛЁНОК $Y_3Fe_5O_{12}(111)$

В.К. Сахаров<sup>1,2</sup>, Ю.В. Хивинцев<sup>1,2</sup>, С.Л. Высоцкий<sup>1,2</sup>, Г.М. Дудко<sup>1,2</sup>,  
Ю.А. Филимонов<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>СФирЭ им. В.А. Котельникова РАН.

<sup>2</sup>СГУ им. Н.Г. Чернышевского

E-mail: [valentin@sakharov.infu](mailto:valentin@sakharov.infu)

Основной особенностью спектра спиновых волн (СВ) в магнетонных кристаллах (МК), обуславливающей возможность создания на их основе разнообразных приборов [1, 2], является формирование запрещённой зоны на частотах  $f_B$  брэгговских резонансов, на которых длина СВ  $\lambda$  и период МК  $\Lambda$  удовлетворяют условию  $\lambda(f_B) = 2\Lambda/n$ , где  $n$  – целое. В субволновом случае ( $\lambda \gg \Lambda$ ) МК выступает в качестве эффективной среды для СВ. При прохождении в такого рода субволновых периодических структурах (СПС) поверхностная магнитостатическая волна (ПМСВ) демонстрирует некоторые особенности [3] в характеристиках АЧХ коэффициента передач  $S_{21}(f)$ , измеренных с помощью контактных структур, возбуждающих лишь длинноволновую часть спектра ПМСВ. В данной работе рассматриваются особенности спектра ПМСВ в СПС для всего диапазона существования ПМСВ.

Для микромагнитного моделирования в программе ООММФ [7] рассматривалась плёнка ЖИГ толщиной  $\approx 7.7$  мкм с кристаллографической ориентацией (111), полем анизотропии - 40 Э с вытравленной на поверхности решёткой из канавок с периодом 8 мкм, глубиной  $\delta$  и шириной  $w$ , которые варьировались в пределах  $\delta = 0.4-2$  мкм,  $w = 0.3-7.7$  мкм. Использовалась конфигурация ПМСВ – внешнее поле в 200 Э было приложено вдоль канавок (оси  $y$ ), тогда как СВ распространялись перпендикулярно им (вдоль оси  $x$ ). Вдоль оси  $y$  были приложены периодические граничные условия. Размеры образца составляли  $x \times y \times z = 2080$  мкм  $\times$  75 нм  $\times$  7.725 мкм, а элементарной ячейки –  $\Delta x \times \Delta y \times \Delta z = 320$  нм  $\times$  75 нм  $\times$  75 нм. Для построения дисперсии ПМСВ и кривых  $S_{21}(f)$  использовалась стандартная процедура [8] возбуждения *sinc*-импульсом с последующим Фурье-преобразованием динамики намагниченности в СПС.

Кубическая анизотропия приводит к формированию мод анизотропных спиновых волн (АСВ) [4-6] вблизи длинноволновой границы  $f_0$  ПМСВ и соответствующих осцилляций до  $\approx 2$  дБ на кривых  $S_{21}(f)$  для гладкой плёнки (рис. 1). Для СПС в той же области вблизи  $f_0$  формируется группа осцилляций с большей амплитудой (до  $\approx 6$  дБ) в результате взаимодействия ПМСВ и АСВ.

Второй интересной особенностью является формирование глубокой и широкой запрещённой зоны в дисперсии и  $S_{21}(f)$  (отмечена звёздочкой на рис. 1а, 1с), не связанной с резонансами Брэгга или собственными колебаниями в системе. Мы показываем, что данная зона образуется в результате взаимодействия ПМСВ, распространяющейся по слою плёнки ЖИГ, не подвергнутой травлению, и ПМСВ, распространяющейся в системе периодических резонаторов, образованных выступами между канавками на поверхности плёнки.

Экспериментальные данные подтверждают наличие в спектре ПМСВ особенностей, обнаруженных в микромагнитном моделировании. Указанные особенности спектра образуют дополнительные области с сингулярностями Ван Хофе и, при покрытии плёнкой Pt, могут демонстрировать рост спинового тока в Pt на соответствующих частотах по аналогии с граничными частотами ПМСВ [9].

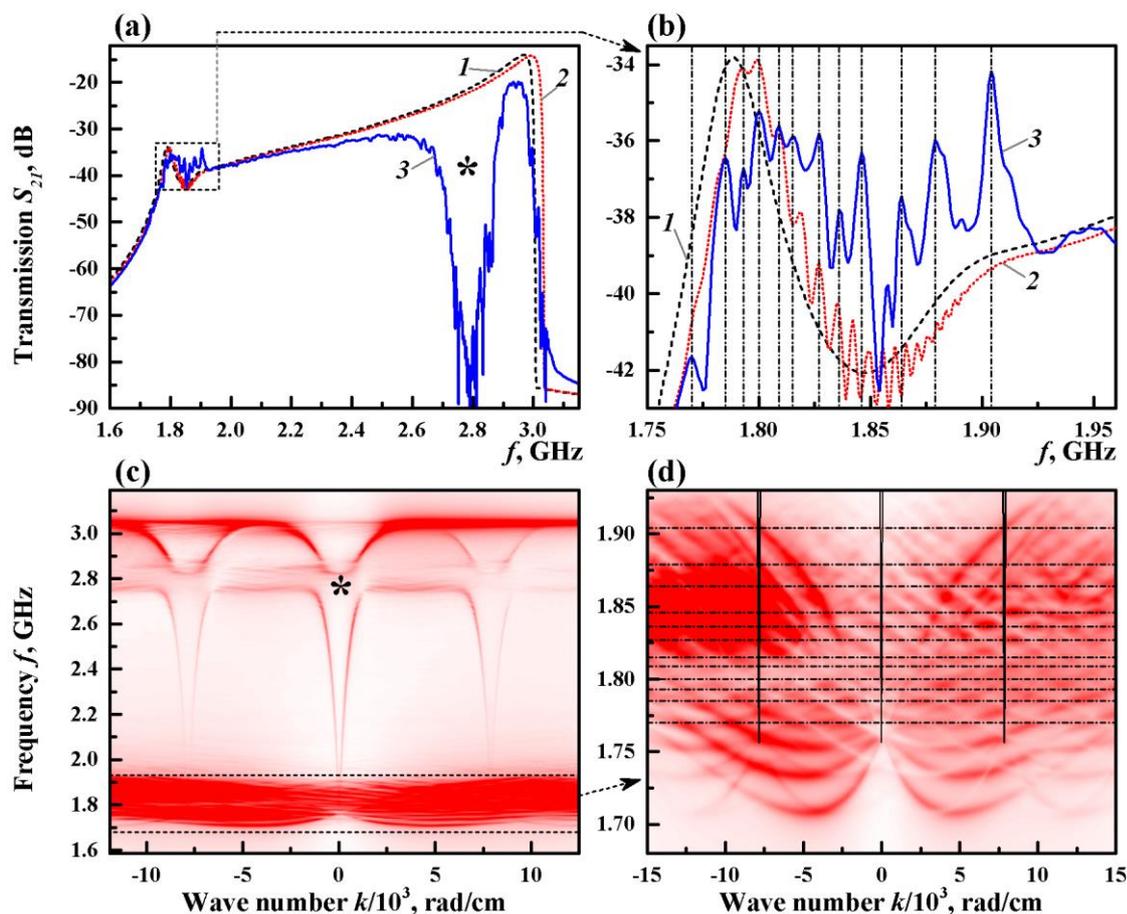


Рис. 1. АЧХ коэффициента передач (а, б) и дисперсии (с, д) в рассматриваемой структуре. (б) и (д) показывают увеличенные участки, выделенные на (а) и (с), соответственно. Кривые  $S_{21}(f)$  соответствуют: 1, 2 – плоской плёнке ЖИГ с/без анизотропии, соответственно; 3 – СПС.

Работа поддержана грантом РФФ №22-19-00500.

#### Библиографический список

1. Chumak A.V., Serga A.A., Hellebrands B. // Nature Com. 2014. V. 5. P. 4700.
2. Wang Q., Pirro P., Verba R. et al. // Science Adv. 2018. V. 4. P. e1701517.
3. Vysotskii S.L., Khivintsev Y.V., Sakharov V.K. et al. // IEEE Mag. Let. 2016. V. 7. P. 3706104.
4. Gieniusz R., Smoczynski L. // JMMM. 1987. V. 66. Pp. 366–372.
5. Kalinikos B.A., Kostylev M.P., Kozhus N.V., Slavin A.N. // J. Phys. 1990. V. 2. Pp. 9861-9877.
6. Zilberman P.E., Kulikov V.M., Tikhonov V.V., Shein I.V. // J. Exp.Theor.Phys. 1991. V.72. P.874.
7. Donahue M.J., Porter D.G. // Interagency Report NISTIR. 1999. P. 6376.
8. Dvornik M., Kuchko A.N., Kruglyak V.V. // J. Appl. Phys. 2011. V. 109. P. 07D350.
9. Никулин Ю.В., Хивинцев Ю.В., Селезнёв М.Е. и др. // Письма в ЖЭТФ. 2024. Т. 119(9). С. 676-683.

## ИССЛЕДОВАНИЕ СПИНОВОЙ НАКАЧКИ С ПОМОЩЬЮ ОБРАТНОГО СПИНОВОГО ЭФФЕКТА ХОЛЛА В МИКРОСТРУКТУРАХ ЖИГ/РТ НА ОСНОВЕ ПЛЕНКИ ЖИГ (100)

Г.М. Амаханов<sup>1,3</sup>, Ю.В. Никулин<sup>1,2</sup>, С.Л. Высоцкий<sup>1,2</sup>, Ю.В. Хивинцев<sup>1,2</sup>,  
А.В. Кожевников<sup>1</sup>, М.Е. Селезнев<sup>1,2</sup>, В.К. Сахаров<sup>1,2</sup>, Ю.А. Филимонов<sup>1,2,3</sup>

<sup>1</sup>Саратовский филиал ИРЭ им. В.А. Котельникова РАН

<sup>2</sup>Саратовский национальный исследовательский государственный университет  
им. Н.Г. Чернышевского

<sup>3</sup>Саратовский государственный технический университет им Ю.А. Гагарина  
E-mail: [agm.05@yandex.ru](mailto:agm.05@yandex.ru)

Спиновая накачка бегущими спиновыми волнами в структурах на основе пленок железиттриевого граната (ЖИГ) и платины (Pt) представляет интерес для разработки энергоэффективной элементной базы на принципах магنونной спинтроники [1]. До недавнего времени основное внимание уделялось исследованию механизмов спиновой накачки в структурах ЖИГ/Pt на основе эпитаксиальных пленок ЖИГ с кристаллографической ориентацией (111) [2]. Целью данной работы является исследование спиновой накачки с помощью обратного спинового эффекта Холла в структуре на основе пленки ЖИГ с кристаллографической ориентацией (100) бегущими поверхностными магнитостатическими волнами (ПМСВ).

В экспериментах использовалась пленка ЖИГ с кристаллографической ориентацией (100), толщиной 16.1 мкм, намагниченностью насыщения  $4\pi M_0 = 1750$  Гс и шириной ферромагнитного резонанса  $\Delta H = 0.5$  Э. Из пленки ЖИГ вырезались два образца вдоль «трудной» [100] и «легкой» [110] осей намагничивания. При помощи методов магнетронного распыления, фотолитографии и ионного травления на поверхности пленок ЖИГ изготавливались две медные микроантенны для возбуждения и приема поверхностной магнитостатической волны (ПМСВ) и Pt элемент для измерения электродвижущей силы (ЭДС). Амплитудно- и фазочастотные характеристики (АЧХ и ФЧХ) коэффициентов передачи и отражения  $S$  измерялись с помощью векторного анализатора цепей, ЭДС регистрировалась с помощью селективного вольтметра в режиме импульсной модуляции с частотой 11.33 КГц, что было необходимо для снижения возможного влияния нагрева микроструктур.

Результаты эксперимента представлены на рис. 1. Положения границ спектра ПМСВ обозначены вертикальными пунктирными линиями  $f_0$  и  $f_s$ . Для случая намагничивания вдоль «легкой» оси спектр ПМСВ оказывается сдвинут «вверх» по частоте на  $\approx 410$  МГц относительно случая «трудной» оси намагничивания (рис. 1 a,b). На рис. 2 (c,d) представлены частотные зависимости ЭДС для 4х случаев в зависимости от направлений распространения ПМСВ и внешнего магнитного поля. Кривые  $1H^+$  и  $2H^-$  отвечают возбуждению ПМСВ первой микроантенны, кривые  $3H^-$  и  $4H^+$  отвечают возбуждению ПМСВ второй микроантенны. Можно видеть, что для рассматриваемых структур знак  $U_{OCЭХ}$  зависит только от направления поля подмагничивания и не меняется с изменением направления распространения волны, что отвечает механизму ОСЭХ. В то же время, разница

в поле анизотропии между направлениями осей намагничивания не влияет на характер зависимостей  $U_{\text{осэж}}$ , где можно видеть два максимума на частотах  $f_0$  и  $f_s$ . Кривые, отмеченные как  $1\text{H}^+$  и  $3\text{H}^-$ , характеризовались двумя пиками вблизи границ  $f_0$  и  $f_s$ , что отвечает характеру плотности состояний в спектре ПМСВ [3]/ Из-за эффекта невзаимности ПМСВ, значения пиков кривых, отмеченных как  $4\text{H}^+$  и  $2\text{H}^-$  уменьшались. При этом значения  $U_{\text{осэж}}$  в случае структуры намагниченной в легком направлении оказывается больше почти в два раза, что можно связать с наличием в спектре анизотропных дипольно-обменных ПСВ участков дисперсии с малой групповой скоростью и высокой плотностью состояний (выделены звездочками на рис. 1 е).

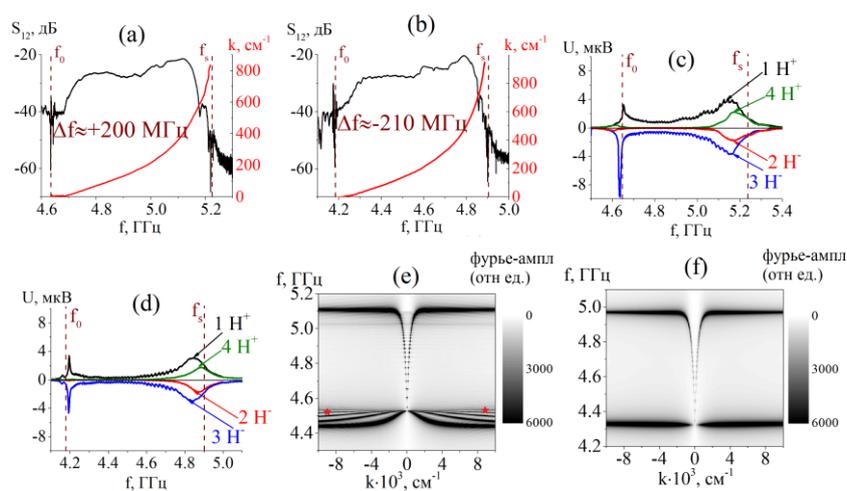


Рис. 1. Частотные зависимости коэффициента передачи  $S_{12}$  и волнового числа  $k$  ПМСВ (а,б) и частотные зависимости ЭДС  $U$  для 4х случаев распространения ПМСВ (с,д), измеренные при  $P_{\text{in}}=-20$  дБм и  $H=939$  Э в структурах, отвечающих случаям «легкая» (а,с) и трудная (б,д) оси намагничивания; пунктирными линиями отмечены нижняя ( $f_0$ ) и верхняя ( $f_s$ ) частотные границы спектра ПМСВ. (е,ф) Дисперсионные кривые дипольно-обменных МСВ, полученные с помощью микромагнитного моделирования для структур с легкой (е) и трудной (ф) осями намагниченности

*Работа выполнена при поддержке РФФ, проект 22-19-00500.*

### Библиографический список

1. *B. Guzowski, R. Gozdur, A. Kociubiński // Acta Physica Polonica. 2019. Vol. 20. № 2. P. 5-8.*
2. *Берегов А.С., Кудинов Е.В. // Электронная техника. Сер. Электроника СВЧ. 1987. № 6(400). С. 8-12.*
3. *Damon R. W., Eshbach J. R. // Journal of Physics and Chemistry of Solids. 1961. Vol. 19. № 3-4. P. 308-320.*

**ВЫЯВЛЕНИЕ РЕЖИМА СКРЫТЫХ КОЛЕБАНИЙ В СИСТЕМЕ ОСЦИЛЛЯТОРА ВАН ДЕР ПОЛЯ С ПАССИВНОЙ НАГРУЗКОЙ****А. А. Тучин<sup>1</sup>, А. В. Купцова<sup>1</sup>, П. В. Купцов<sup>2,1</sup>**<sup>1</sup>*СГТУ имени Гагарина Ю. А.*<sup>2</sup>*Саратовский филиал ИРЭ им. В.А. Котельникова РАН.**E-mail: [kupav@mail.ru](mailto:kupav@mail.ru)*

Скрытые колебания — это сравнительно недавно обнаруженный феномен нелинейной динамики [1]. В отличие от «обычных», самовозбуждающихся аттракторов, бассейны притяжения скрытых аттракторов не имеют пересечений с малой окрестностью неподвижной точки и в силу этого их обнаружение затруднено, так как априори неизвестно как задать начальные условия, что бы система вышла на режим скрытых колебаний. Наличие в фазовом пространстве рядом с установившимся режимом ещё одного, условия выхода на который неизвестны, может быть источником нежелательного поведения системы. При наличии возмущений она может переключиться на этот режим что может привести к драматическим последствиям.

В настоящей работе мы рассматриваем осциллятор Ван дер Поля связанный с пассивным контуром [2]. Цель работы состоит в том, чтобы показать, что даже в такой простой, классической системе возможно возникновение скрытого аттрактора. Мы подробно исследуем бистабильность самовозбуждающегося и скрытого аттрактора, сопоставляем её особенности с бистабильностью в виде гистерезиса.

**Библиографический список**

1. Leonov G. A., Kuznetsov N. V. // International Journal of Bifurcation and Chaos. 2013. Т. 23. №1. С. 1330002.
2. Astakhov O. V., Astakhov S. V., Krakhovskaya N. S. и др. // Chaos: An Interdisciplinary Journal of Nonlinear Science. 2018. — 06. Т. 28. №6. С. 063118.

## ОЦЕНКА КАЧЕСТВА И НАДЕЖНОСТИ InGaN/GaN СВЕТОДИОДОВ И СВЕТОДИОДНЫХ МАТРИЦ ПО КРУТИЗНЕ ВАТТ-АМПЕРНОЙ ХАРАКТЕРИСТИКИ

И.В. Фролов<sup>1</sup>, О.А. Радаев<sup>1</sup>, В.А. Сергеев<sup>1,2</sup>, С.А. Зайцев<sup>3</sup>

<sup>1</sup>УФИРЭ им. В. А. Котельникова РАН

<sup>2</sup>Ульяновский государственный технический университет,

3 АО «Ульяновское бюро приборостроения»

E-mail: [ilya-frolov88@mail.ru](mailto:ilya-frolov88@mail.ru)

Известно, что темп деградации характеристик светодиодов (СИД) в процессе работы даже в пределах одной партии может существенно различаться [1], что может стать причиной изменений светотехнических характеристик светодиодных устройств [2].

Одной из основных характеристик СИД является ватт-амперная характеристика. В работах [3, 4] показано, что наиболее чувствительным к дефектам гетероструктуры является начальный участок ватт-амперной характеристики СИД. Для аппроксимации ватт-амперной характеристики СИД в диапазоне малых токов в работе [5] на основе АВС модели рекомбинации носителей заряда в гетероструктуре получена функция

$$P(I) = \frac{m}{2} (\sqrt{1 + 2qI} - 1)^2, \quad (1)$$

где коэффициенты  $m$  и  $q$  связаны с рекомбинационными параметрами гетероструктуры, причем коэффициент  $q$ , определяющий крутизну ватт-амперной характеристики, прямо пропорционален коэффициенту излучательной рекомбинации  $B$  и обратно пропорционален квадрату коэффициента  $A$  безызлучательной рекомбинации.

В свою очередь, согласно [6], коэффициент безызлучательной рекомбинации  $A$  пропорционален концентрации дефектов:  $A \sim N_T$ . Таким образом, концентрация дефектов  $N_T$  и параметр  $q$  связаны зависимостями:

$$N_T \sim q^{-0.5}. \quad (2)$$

Исследованы коммерческие СИД зеленого свечения с кристаллом размером  $340 \times 270 \times 100$  мкм на сапфировой подложке, с длиной волны в максимуме спектра излучения 525 нм, с рабочим током 20 мА и максимальной плотностью постоянного тока  $35 \text{ А/см}^2$ . СИД были испытаны при комнатной температуре в импульсном режиме при амплитудном значении плотности тока  $100 \text{ А/см}^2$ , длительности импульса  $\tau = 500$  мкс и периоде следования импульсов тока  $T = 5$  мс в течение 160 ч.

При испытаниях контролировалось изменение светового потока и ватт-амперных характеристик в диапазоне токов от 100 нА до 10 мкА. Измерение светового потока проводилось при токе 20 мА на измерителе ТКА-КК1, представляющего собой интегрирующую сферу. Ватт-амперные характеристики регистрировали измерителем порогового тока СИД [7]. Параметр  $q$  определяли путем аппроксимации результатов измерений функцией (1) методом наименьших квадратов. У СИД исследованной выборки параметр  $q$  принимал значения в диапазоне от  $282159 \text{ А}^{-1}$  до  $2939648 \text{ А}^{-1}$ .

В процессе ускоренных испытаний происходило монотонное снижение светового потока излучения всех исследованных СИД. Усредненная кривая спада светового потока показана на рис. 1. Спад светового потока сопровождался увеличением параметра  $q^{-0,5}$ , что связано с образованием дефектов гетероструктуры  $N_T$  под действием тока. Усредненная по выборке зависимость  $q^{-0,5}(t)$  показана на рис. 2.

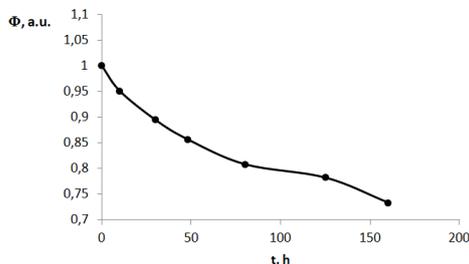


Рис. 1. Спад светового потока излучения светодиодов в процессе испытаний.

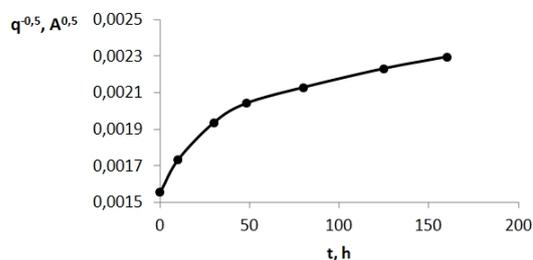


Рис. 2. Изменение параметра  $q^{-0,5}$  в процессе испытаний.

Установлено, что у СИД, у которых параметр  $q^{-0,5}$  принимает большие значения, световой поток в процессе ускоренных испытаний спадает быстрее, чем у СИД с малым значением  $q^{-0,5}$ . Коэффициент корреляции между величинами  $\Delta\Phi_{160h}$  и  $q^{-0,5}$  равен 0.93

Исследованы светодиодные матрицы GW P9LT31.EM DURIS S 8 Osram, состоящие из десяти последовательно соединенных кристаллов. Измерения ватт-амперных характеристик кристаллов матриц проводились на аппаратно-программном комплексе [8]. Среднее значение параметра  $q$  составило  $1971000 \text{ A}^{-1}$ , а относительное среднее квадратическое отклонение 4 % от среднего значения. Разброс значений параметра  $q$  указывает на различие степени дефектности кристаллов в составе матрицы.

Таким образом, параметр  $q$ , определяющий крутизну ватт-амперной характеристики InGaN/GaN СИД в диапазоне малых токов, может использоваться для оценки качества СИД и светодиодных матриц и определения потенциальной степени деградации светового потока СИД при испытаниях.

*Работа выполнена в рамках государственного задания ИРЭ им. В.А. Котельникова РАН.*

#### Библиографический список

1. Сушков В., Никифоров С. // Полупроводниковая светотехника. 2011. №3.
2. Коваленко О.Ю., Журавлева Ю.А., Микаева С.А., Немов В.В. // Вестник МГТУ. 2019. № 22(4). С. 471-476.
3. Сергеев В.А., Радаев О.А., Фролов И.В., Черторийский А.А. // Известия вузов. Электроника. 2017. №22 (1). С. 92-95.
4. Renso N., De Santi C., Caria A., et al. // Journal of Applied Physics. 2020. V. 127. P.185701.
5. Сергеев В.А., Радаев О.А., Фролов И.В. // Приборы и техника эксперимента. 2023. V.6. P.103-110.
6. Xu L.W., Qian K.Y. // IEEE Photonics Journal. 2017. V.9(4). P. 8201309.
7. Радаев О.А., Сергеев В.А., Фролов И.В. // Физические основы приборостроения. 2023. V. 12 (3). P. 23-27.
8. Frolov I.V., Segeev V.A., Radaev O.A. // IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement. 2023. V. 72. P. 5000806.

## ВЛИЯНИЕ ЖИГ-РЕЗОНАТОРА НА РАСПРОСТРАНЕНИЕ СПИНОВЫХ ВОЛН В ЗИГЗАГООБРАЗНОЙ СТРУКТУРЕ

**И.О. Фильченков, В.А. Зюзин А.В. Садовников**

*Саратовский национальный исследовательский государственный университет*

*им. Н.Г. Чернышевского*

*E-mail: [infachforever@gmail.com](mailto:infachforever@gmail.com)*

В последние годы развитие в технологиях создания планарных магнитных структур открывают новые горизонты для исследования динамики спиновых волн (СВ) при их возбуждении и распространении в волноводах микронного и нанометрового масштаба [1]. Исследования показывают, что СВ могут стать эффективными носителями информационных сигналов [2]. Постоянное совершенствование технологий интегральных схем позволяет разрабатывать структуры с повышенной плотностью магнитных функциональных элементов [3]. Актуальность изучения магнитных структур с периодически изменяющимися параметрами на основе магнитных пленок, в которых распространяются спиновые волны, возрастает. Эти структуры обладают уникальным свойством — наличием запрещенных зон (ЗЗ) в спектре прохождения спиновых волн, возникающих в результате взаимодействия прямых и встречных волн во время распространения по периодической системе [4].

В настоящей работе методом микромагнитного моделирования в программе *muMax3* [5] предлагается исследовать эффекты, возникающие при распространении спиновых волн в магнитных кристаллических микроволноводах с зигзагообразной структурой. Для управления свойствами спиновой волны в данной структуре был использован ЖИГ-резонатор. На рисунке 1а показана схема зигзагообразного ЖИГ микроволновода с параметрами: ширина волновода составляет  $a = 200$  мкм, длина его регулярной части -  $b = 400$  мкм, а длина наклонной части -  $c = 400$  мкм. Общая длина структуры равна 2900 мкм. Диагонали ЖИГ-резонаторов имеют размеры  $d = 300$  мкм и  $e = 500$  мкм. Положение микрорезонатора изменялось вдоль оси  $g$ . Исследование распространения спиновой волны проводилось для угла наклона  $\varphi = 30^\circ$ .

На рисунке 1б изображена амплитудно-частотная характеристика (АЧХ) при положении резонатора на расстоянии 200 мкм. АЧХ в данном случае совпадает со случаем, когда резонатора нет вовсе из-за того, что на таком расстоянии влияние волновода на прохождение волны минимально. Распределение внутреннего магнитного поля для такой системы представлен на рисунке 1г. АЧХ при уменьшении расстояния между резонатором и волноводом до 40, 30 и 20 мкм (рис. 1в) демонстрирует следующие изменения: наблюдается уменьшение глубины двух запрещенных зон на рис. 1б, при этом возникает центральная запрещенная зона становится. Эти изменения указывают на усиление взаимодействия между резонатором и волноводом при уменьшении расстояния, что приводит к изменению характеристик волнового распространения в структуре. На рисунке 1д можно наблюдать, что при уменьшении расстояния резонатор оказывает значительное влияние на внутреннее поле в волноводе, что приводит к изменению амплитудно-частотной характеристики. Это взаимодействие усиливается по

мере приближения резонатора, что вызывает перестройку запрещённых зон и изменение общей картины распространения волны в структуре.

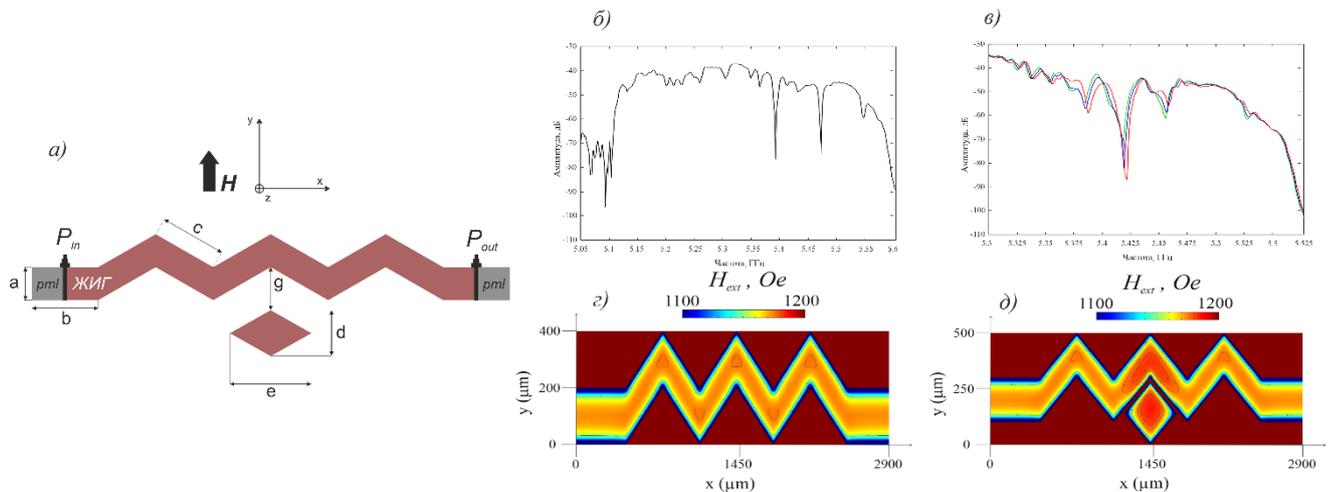


Рис. 1. (а) Схематическое изображение структуры.

(б) Амплитудно-частотная характеристика зигзагообразной структуры при  $g = 200$  мкм. (в) Амплитудно-частотная характеристика зигзагообразной структуры при  $g = 40$  (зеленая линия), 30 (синяя линия), 20 (красная линия) мкм. (г) Распределение внутреннего магнитного поля в структуре при  $g = 200$  мкм. (д) Распределение внутреннего магнитного поля в структуре при  $g = 20$  мкм.

В данной работе исследована зигзагообразная структура микроволновода на основе ЖИГ-плёнки. Полученные результаты позволяют сделать вывод о том, что в данной зигзагообразной структуре могут формироваться запрещённые зоны спиновых волн. Более того, продемонстрирована возможность управлять конфигурацией этих запрещённых зон путём изменения расстояния между волноводом и резонатором. Периодические магнитные кристаллы могут быть использованы в магнитоэлектронике для разработки функциональных элементов, таких как фильтры, интерферометры и демультимплексеры.

*Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда в рамках выполнения проекта №23-79-30027.*

#### Библиографический список

1. Kruglyak V.V., Demokritov S.O., Grundler D. // J. Phys. D: Appl. Phys. 2010. V. 43. P. 264001
1. Serga A.A., Chumak A.V., Hillebrands B. // J. Phys. D: Appl. Phys. 2010. V. 43. P. 264002
2. Sadovnikov A.V., Grachev A.A., Sheshukova S.E., Sharaevskii Yu.P., Serdobintsev A.A., Mitin D.M., Nikitov S.A. // Phys. Rev. Lett. 2018. V. 120. P. 257203
3. Noginova N., Gubanov V., Shahabuddin M., Gubanova Yu. // Appl. Magn. Reson. 2021. V. 52. Pp. 749-758
4. Vansteenkiste A., Van de Wiele B. // J. Magn. Magn. Mater. 2011. V. 323. Pp. 2585-2591

## ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ ХАОТИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ И СИСТЕМЫ С МНОГОЧАСТОТНОЙ КВАЗИПЕРИОДИЧНОСТЬЮ

А.П. Кузнецов<sup>1</sup>, Л.В. Тюрюкина<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup> Саратовский филиал ИРЭ им. В.А. Котельникова РАН.

<sup>2</sup> Саратовский государственный университет им. Н. Г. Чернышевского

E-mail: turukinalv@yandex.ru

Соотношение квазипериодической и хаотической динамики в нелинейных системах привлекает внимание, начиная с известных работ Ландау и Хопфа [1,2]. В получившем их имя сценарии происходит поэтапное увеличение размерности инвариантных торов в результате каскада квазипериодических бифуркаций Хопфа. Несмотря на критику Рюэля и Такенса, сообщения о возможности многочастотных торов и сценария Ландау-Хопфа периодически появляются в литературе [3-6]. В связи с этим возникает вопрос о взаимном влиянии режимов с многомерными торами и хаосом. Случай простейшего двухчастотного режима и хаоса рассмотрен в [7]. В настоящей работе исследуется взаимодействие хаоса на торы более высокой размерности, для которых возможен сценарий Ландау-Хопфа.

В качестве квазипериодической подсистемы будем использовать ансамбль пяти глобально связанных осцилляторов ван дер Поля [8], демонстрирующий такой сценарий за счет неидентичности осцилляторов по параметрам возбуждения. В качестве хаотической подсистемы выберем две модели: классический осциллятор Ресслера [9] и генератор Кислова-Дмитриева [10]. В первом случае исследуемая система будет иметь вид:

$$\begin{aligned} \ddot{x}_n - (\lambda_n - x_n^2)\dot{x}_n + (1 + \Delta_{n-1})x_n + \frac{\mu}{4} \sum_{i=1}^5 (\dot{x}_n - \dot{x}_i) &= 0, \\ \ddot{x}_5 - (\lambda_5 - x_5^2)\dot{x}_5 + (1 + \Delta)x_5 + \frac{\mu}{4} \sum_{i=1}^5 (\dot{x}_5 - \dot{x}_i) + k(\dot{x}_5 - \dot{x}) &= 0, \\ \dot{x} &= -y - z, \\ \dot{y} &= x + py + k(\dot{x}_5 - y), \\ \dot{z} &= q + (x - r)z. \end{aligned} \tag{1}$$

Здесь  $\lambda_n$  – параметры возбуждения осцилляторов ван дер Поля,  $\mu$  – их связь друг с другом,  $\Delta_{n-1} = \Delta(n-1)/4$  – частотные расстройки,  $p, q, r$  – параметры системы Ресслера, параметр  $k$  отвечает за ее связь с квазипериодической подсистемой. А во втором:

$$\begin{aligned} \ddot{x} + \frac{1}{Q}\dot{x} + \omega_0^2 x + k(\dot{x} - \dot{x}_5) &= z, \\ T\dot{z} + z &= Mx \exp(-x^2), \\ \ddot{x}_n - (\lambda_n - x_n^2)\dot{x}_n + \left(1 + \frac{\Delta}{4}(n-1)\right)x_n + \frac{\mu}{4} \sum_{i=1}^5 (\dot{x}_n - \dot{x}_i) &= 0, \\ \ddot{x}_5 - (\lambda_5 - x_5^2)\dot{x}_5 + (1 + \Delta)x_5 + \frac{\mu}{4} \sum_{i=1}^5 (\dot{x}_5 - \dot{x}_i) + k(\dot{x}_5 - \dot{x}) &= 0. \end{aligned} \tag{2}$$

Здесь, в свою очередь,  $x$ ,  $z$  – переменные, а  $T$ ,  $Q$ ,  $M$  и  $\omega_0$  – параметры генератора Кислова-Дмитриева. Переменные и параметры квазипериодической подсистемы те же, что и в первом случае. Параметр  $k$  как и ранее отвечает за связь между подсистемами. В обоих случаях связь осуществляется через пятый генератор ван дер Поля, и является диссипативной.

По аналогии с работой [8] выберем значения параметров возбуждения генераторов ван дер Поля  $\lambda_1=0.1$ ,  $\lambda_2=0.2$ ,  $\lambda_3=0.3$ ,  $\lambda_4=0.4$ ,  $\lambda_5=0.5$ , а  $\Delta=3$ . В этом случае в квазипериодической подсистеме при уменьшении «внутреннего» параметра связи  $\mu$  происходит поэтапный переход от периодического режима к пятичастотному квазипериодическому в соответствии со сценарием Ландау-Хопфа. Для хаотических подсистем параметры выбирались такими, чтобы в них наблюдался хаос. В случае системы Ресслера это значения  $p=0.15$ ,  $q=0.4$ ,  $r=8.5$  (случай «слабого» хаоса) и  $p=0.35$ ,  $q=0.4$ ,  $r=8.5$  (случай более развитого хаоса). А в случае генератора Кислова-Дмитриева -  $T=10$ ,  $Q=20$ ,  $M=2.75$ ,  $\omega_0=0.5$ .

Исследование обеих моделей проводилось постпредством построения графиков восьми старших показателей Ляпунова в зависимости как от параметра связи подсистем  $k$ , так и «внутреннего» параметра связи генераторов ван дер Поля  $\mu$ . А тип наблюдаемого режима идентифицировался по спектру показателей Ляпунова. Исследование показало, что взаимодействие хаотической подсистемы с подсистемой с многочастотными колебаниями приводит к существенным особенностям: появление тора более высокой размерности, его удвоения, каскад своеобразных бифуркаций, отвечающих поэтапному увеличению числа нулевых ляпуновских показателей в хаотическом режиме. Показана также устойчивость сценарий Ландау-Хопфа по отношению к взаимодействию с хаотической подсистемой при сравнительно большой их связи. Отметим, что возможность новых разновидностей хаоса может представлять интерес с точки зрения возможных приложений, например, в задачах коммуникации.

*Исследование выполнено в рамках госзадания Института радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН.*

#### Библиографический список

1. *L.D. Landau* // Dokl. Akad. Nauk USSR, 1944, № 44, с. 311 (1944).
2. *E. Hopf* // Communications on Pure and Applied Mathematics, 1948, Т. 1, № 4, с.303-322.
3. *V. Anishchenko, S. Nikolaev, J. Kurths* // Phys. Rev. E, 2006, Т. 73, № 5, с. 056202.
4. *Y.P. Emelianova. et al.* // Physica D, 2013, Т. 244, № 1, с. 36-49.
5. *Kuznetsov A.P., Sataev I.R., Turukina L.V.* // International Journal of Bifurcation and Chaos, 2022, Т. 32, №. 03, С. 2230008.
6. *Stankevich N. V., Kuznetsov A. P., Seleznev E. P.* //Chaos, Solitons & Fractals, 2021, Т. 147, С. 110998.
7. *Kuznetsov A. P., Sedova Y. V., Stankevich N. V.* //Chaos, Solitons & Fractals, 2023, Т. 169, С. 113278.
8. *A.P. Kuznetsov et al.* // Physics Letters A, 2013, Т. 377, № 45-48, с. 3291-3295.
9. *Rössler O.E.* //Physics Letters A, 1976, Т. 57, №. 5, с. 397-398.
10. А. Дмитриев, Е. Ефремова, Н. Максимов, А. Панас, Генерация хаоса, Litres, 2022.

## ИСПОЛЬЗОВАНИЕ PSEVEN В РЕШЕНИИ ЗАДАЧ ОПТИМИЗАЦИИ- ЭЛЕКТРОННО-ВОЛНОВОГО ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ПРИМЕНИТЕЛЬНО К ЛБВ О-ТИПА

**И.А. Чистяков<sup>1,2,3</sup>, Д.Н. Золотых<sup>1,2,3</sup>, И.П. Медведков<sup>1</sup>**

<sup>1</sup>*Саратовский национальный исследовательский государственный университет  
им. Н.Г. Чернышевского*

<sup>2</sup>*Акционерное общество «Научно-производственное предприятие «Алмаз»*

<sup>3</sup>*Саратовский филиал ИРЭ РАН им. Котельникова*

*E-mail: [ivan.chistyakov99@gmail.com](mailto:ivan.chistyakov99@gmail.com)*

Исследования, связанные с повышением эффективности взаимодействия электронных потоков с электромагнитными полями всегда занимали одно из центральных мест в электронике. В последние годы требования к выходным характеристикам приборов стали комплексными, например, в космических системах связи необходимы приборы, сочетающие высокий КПД и малый уровень нелинейных искажений в условиях ограниченного энергопотребления [1].

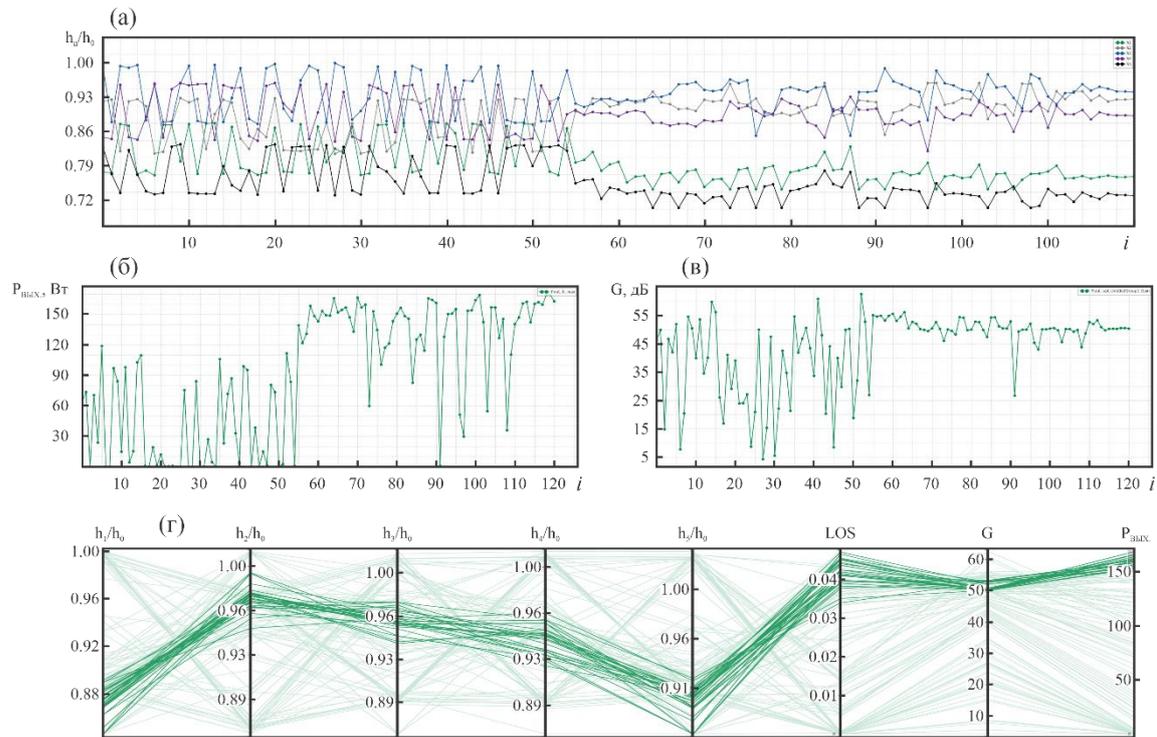
В работе представлен опыт использования pSeven применительно к решению задачи электронно-волнового взаимодействия в лампе бегущей волны О-типа. Для определения выходных характеристик ЛБВ была использована программа [2], основанная на решении нелинейных уравнений взаимодействия электронного потока с электромагнитным полем замедляющей системы в одномерном приближении.

Известно, что при численном моделировании на выходные характеристики ЛБВ оказывают существенное влияние следующие параметры:

- электродинамические (геометрия ВЧ-пакета, свойства материалов);
- конструктивные (разрывы, конфигурация локальных поглотителей СВЧ-энергии, длина пространства взаимодействия)
- параметры режима (частота, ускоряющее напряжение, ток пучка, мощность входного сигнала и т.д.).

Однако, на конструктивные параметры наложены строгие технологические и производственные ограничения, а соблюдение требований технического задания обязывает сохранить постоянными параметры электрического режима. Варьирование величин электродинамических параметров в данном случае способно заметно улучшить значение выходных характеристик.

Первым этапом в оптимизации служила конфигурация пространства взаимодействия, выдающая среднюю выходную мощностью  $\approx 140$  Вт с коэффициентом усиления  $\approx 53.1$  дБ. В качестве варьируемых параметров выбраны 5 значений шага из закона изменения для диаметров экрана от 2.5 до 2.9 мм. Прочие параметры ВЧ-пакета, электрического режима и распределения локальных поглотителей СВЧ-энергии оставались неизменными. На рис. 1 изображен результат работы двухуровневой оптимизации электронно-волнового взаимодействия.



**Рис. 1.** Результаты численного анализа пространства взаимодействия с использованием алгоритмов оптимизации, где (а) – зависимость варьируемых целевых параметров от номера итерации, (б) – зависимость целевой функции от номера итерации, (г) – зависимость коэффициента усиления от номера итерации, (г) – диаграмма параллельных координат целевой функции, варьируемых и отслеживаемых переменных

Оптимизация закона изменения шага спирали позволила определить оптимальный диаметр экрана (оболочки ВЧ-пакета), равный 2.8 мм, а также увеличить выходную мощность на 16 Вт (11.8% относительных) в среднем по диапазон, а коэффициент усиления на 2.6 дБ (4.9% относительных), а также значительно выровнять АЧХ и уменьшить величину перепада выходной мощности и коэффициента усиления в рабочей полосе частот.

### Библиографический список

1. *Роговин В. И., Тюрин Д. А. Проектирование пространства взаимодействия лампы бегущей волны с использованием метода оптимизации //Радиотехника. 2020. Т. 84. №. 3. С. 54-60.*
2. *Ильина Е. М., Филатов В. А., Конторин Ю. Ф. Усовершенствованные одномерная нелинейная модель и программа расчета выходных характеристик ЛБВ //Материалы XII Зимней школы-семинара по СВЧ электронике и радиофизике. Саратов: Изд-во ГосУНЦ «Колледж. – 2002. – С. 40-43. Нестеров Ю. Е. Методы выпуклой оптимизации. 2007.*

**ОБРАТНЫЙ СПИНОВЫЙ ЭФФЕКТ ХОЛЛА  
В СТРУКТУРЕ «МАГНОННЫЙ КРИСТАЛЛ – ПЛАТИНА»  
В МАЛЫХ ПОЛЯХ ПОДМАГНИЧИВАНИЯ**

**Г.М. Амаханов<sup>1,2</sup>, С.Л. Высоцкий<sup>1,3</sup>, М.Е. Селезнев<sup>1,3</sup>, Ю.В. Никулин<sup>1,3</sup>**

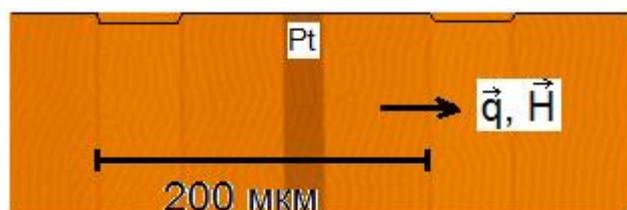
<sup>1</sup>Саратовский филиал ИРЭ им. В.А. Котельникова РАН.

<sup>2</sup>Саратовский государственный технический университет имени Гагарина Ю.А.

<sup>3</sup>Саратовский национальный исследовательский государственный университет  
им. Н.Г. Чернышевского  
E-mail: agm.05@yandex.ru

Обратный спиновый эффект Холла (ОСЭХ) в слоистых структурах «феррит - тяжелый металл» известен уже более четырех десятилетий [1]. В последнее десятилетие с его использованием связывается возможность построения устройств магноники и спинтроники [2]. В эксперименте, как правило, исследуются структуры, состоящие из пленок железо-иттриевого граната (ЖИГ) и платины. При наличии в пленке ЖИГ спин-волновых возбуждений в пленке платины генерируется ток носителей заряда, то есть спиновый ток в пленке ЖИГ преобразуется в ток носителей заряда в пленке платины. Эффект наблюдается не только в случае намагничивания пленки ЖИГ до насыщения [3], но и в малых полях подмагничивания в условиях формирования доменной структуры (ДС) [4].

В данной работе исследовано влияние профилирования пленки ЖИГ на возможность наблюдения ОСЭХ. На поверхности пленки ЖИГ толщиной 12,3 мкм вытравливалась периодическая ( $\Lambda = 200$  мкм) решетка из канавок шириной 60 мкм, глубиной 0,3 мкм (схематически изображена на рисунке). На плато структуры наносилась полоска платины шириной 25 мкм, толщиной 4 нм (см. рис.). Измерения проводились в геометрии обратных объемных магнитостатических волн по методике [4]. Показано, что профилирование поверхности пленки ЖИГ не вызвало искажений ДС (см. рис.), а частотные области наблюдения спин-волновых возбуждений и зависимости измеряемых величин падения напряжения на



полоске платины от величины поля подмагничивания коррелируют с результатами измерений для структуры с плоской пленкой ЖИГ.

Рис. 1. Микрофотография исследованной структуры.

*Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда (грант № 24-29-00640).*

#### Библиографический список

1. Dyakonov M.I., Perel V.I.// Phys. Lett. A. 1971. Vol. 35. P. 459.
2. Hirohata A., Yamada K., Nakatani Y. et al.// JMMM. 2020. V. 509. P. 166711.
3. Селезнев М.Е., Никулин Ю.В., Хивинцев Ю.В. и др.// Изв. вузов. ПНД. 2023. Т. 31(2). С. 225.
4. Высоцкий С.Л., Селезнев М.Е., Никулин Ю.В. и др.// ФТТ. 2024. Т. 66(7). С. 1057

## ПЕРЕМЕЖАЮЩАЯСЯ ОБОБЩЕННАЯ СИНХРОНИЗАЦИЯ В ОДНОНАПРАВЛЕННО СВЯЗАННЫХ СИСТЕМАХ С ЗАПАЗДЫВА- НИЕМ

**В.А. Ханадеев, О.И. Москаленко**

*ФГБОУ ВО “Саратовский национальный исследовательский государственный университет  
им. Н.Г. Чернышевского”*

*E-mail: [v.a.hanadeev@gmail.com](mailto:v.a.hanadeev@gmail.com)*

Благодаря своей универсальности перемежаемость может быть обнаружена при взаимодействии систем различной природы. Известно, что это явление возникает при переходе от периодических колебаний к хаотическим, а также предшествует наступлению различных типов синхронизации. В рамках настоящего доклада рассматривается перемежающееся поведение вблизи границы обобщенной синхронизации – так называемый режим перемежающейся обобщенной синхронизации [1,2]; и если в режиме обобщенной синхронизации между состояниями взаимодействующих систем устанавливается функциональная зависимость в любой момент времени после завершения переходного процесса [3,4], то в режиме перемежающейся обобщенной синхронизации такая функциональная связь имеет место только в определенные моменты времени, называемые ламинарными фазами, в то время как на фоне ламинарных фаз наблюдаются кратковременные турбулентные всплески, в течение которых функциональная связь между взаимодействующими системами отсутствует. В настоящее время перемежающаяся обобщенная синхронизация исследована достаточно хорошо в различных классах динамических систем, способных демонстрировать хаотическую динамику, однако, до сих пор не изучен этот режим в системах с запаздыванием, являющихся моделями реальных физических и биологических систем.

Целью настоящей работы является исследование возможности существования перемежаемости на границе обобщенной синхронизации в однонаправленно связанных системах с запаздыванием. В качестве объекта исследования в работе выбрана система двух однонаправленно связанных радиотехнических генераторов с запаздыванием, описываемая следующими уравнениями [5]:

$$\begin{aligned}\dot{x}_1(t) &= -x_1(t) + k_1 f(x_1(t - \tau)), \\ \dot{x}_2(t) &= -x_2(t) + k_2 f(x_2(t - \tau)) + k_3 [f(x_1(t - \tau)) - f(x_2(t - \tau))],\end{aligned}\tag{1}$$

где  $x_1(t)$  и  $x_2(t)$  – переменные, характеризующие состояния ведущей и ведомой систем, соответственно,  $k_1=1.015$ ,  $k_2=1.004$  – параметры этих систем,  $k_3$  – параметр связи,  $f(x) = a - x^2$  – нелинейная функция,  $a = 1.5$  – управляющий параметр,  $\tau = 10$  – время запаздывания.

Режим обобщенной синхронизации в исследуемых системах (1) диагностировался с использованием метода расчета спектра показателей Ляпунова, предложенного в работе [6], и при помощи метода вспомогательной системы [7]. Для определения типа перемежаемости при помощи того же метода вспомогательной системы рассчитаны статистические характеристики: распределения длительностей ламинарных фаз и зависимости средней длительности ламинарных фаз от

параметра связи. Оказалось, что полученные статистические характеристики полностью соответствуют теоретическим закономерностям, характерным для перемежаемости типа on-off. Аналогичные закономерности обнаружены для системы (1) при изменении управляющих параметров взаимодействующих систем.

Таким образом, в настоящей работе была обнаружена перемежаемость на границе обобщенной синхронизации в двух однонаправленно связанных генераторах с запаздыванием. Выявлено, что независимо от выбора значений управляющих параметров взаимодействующих систем данный тип перемежаемости можно классифицировать как перемежаемость типа on-off.

*Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 24-22-00033, <https://rscf.ru/project/24-22-00033>.*

### Библиографический список

1. *Hramov A.E., Koronovskii A.A.* // Europhysics Letters. 2005. V. 70. N. 2. P. 169-175.
2. *Koronovskii A.A., Moskalenko O.I., Pivovarov A.A., Khanadeev V.A., Hramov A.E., Pisarchik A.N.* // Phys. Rev. E. 2020. V. 102. P. 012205.
3. *Rulkov N.F., Sushchik M.M., Tsimring L.S., Abarbanel H.D.I.* // Phys. Rev. E. 1995. V. 51, № 2. P. 980–994.
4. *Moskalenko O.I., Koronovskii A.A., Hramov A.E., Boccaletti S.* // Phys. Rev. E. 2012. V. 86, № 3. P. 036216.
5. *Пономаренко В.И., Прохоров М.Д.* // Письма в ЖТФ. 2002. Т. 28, №. 16. С. 37–44.
6. *Колоскова, А.Д., Москаленко О.И., Короновский Л.Л.* // Письма в ЖТФ. 2018. Т. 44, Ж 9. С. 19-25.
7. *Abarbanel H.D.I., Rulkov N.F., Sushchik M.M.* // Phys. Rev. E. 1996. V. 53, No. 5. P. 4528–4535.

## ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ ОТКЛОНЕНИЙ УПРАВЛЯЮЩЕЙ СЕТКИ МНОГОЛУЧЕВОЙ ЭЛЕКТРОННОЙ ПУШКИ НА УРОВЕНЬ ТОКОПРОХОЖДЕНИЯ

Д.Л. Шалашова<sup>1,2</sup>, М.В. Рахматулин<sup>1,2</sup>, Е.С. Молякова<sup>1</sup>, И.О. Чигуров<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Акционерное общество «Научно-производственное предприятие «Алмаз».

<sup>2</sup>Саратовский государственный технический университет им. Гагарина Ю. А.

E-mail: [darasalasova@gmail.com](mailto:darasalasova@gmail.com)

Многолучевые клистроны (МЛК) находят широкое применение в различных областях науки и техники, таких как медицинская техника, телевидение, связь, радиолокация, промышленный нагрев и т.д. К основным тенденциям развития МЛК можно отнести увеличение частоты сигнала, повышение коэффициента полезного действия, снижение массы и габаритов, а также использование новых режимов работы. [1,2]

Увеличение частоты сигнала, в связи с тем, что частота обратно пропорциональна размерам резонаторов, приводит к уменьшению геометрических размеров, и, как следствие, уменьшению диаметра пролетных каналов. Вследствие этого возрастает сложность обеспечения высокого уровня токопрохождения.

Целью настоящей работы является качественная оценка влияния отклонений управляющей сетки многолучевой электронной пушки для приборов клистронного типа на уровень токопрохождения в области влета в анодный блок. Результаты, полученные в данном исследовании, могут лечь в основу для выбора допусков при разработке новых изделий клистронного типа.

Объектом исследования является девятнадцатилучевая пушка с управляющей сеткой и анодом. На рисунке 1 представлена 3D-модель построенная в программе CST Particle Studio. [3] Она состоит из девятнадцатилучевого катода 1, управляющей сетки 2 и анода 3.

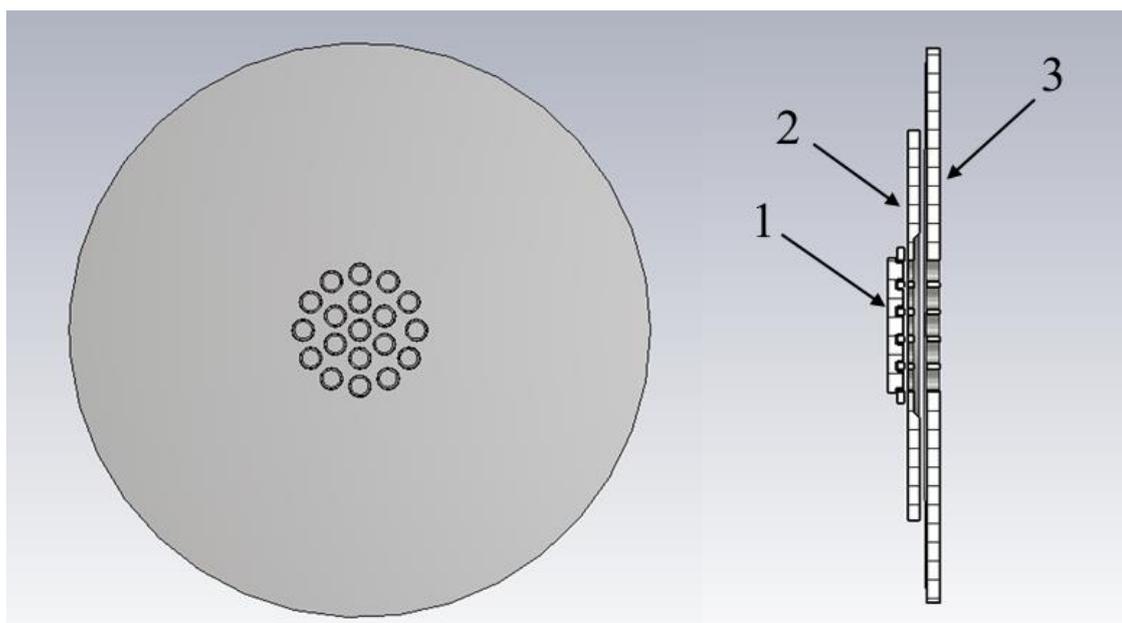


Рис. 1. 3D-модель исследуемой многолучевой пушки.

В программе CST Particle Studio было проведено моделирование траекторий заряженных частиц в электростатических полях.

Полученные результаты показывают, что поворот управляющей сетки вплоть до  $1^\circ$  не оказывает существенного влияния на траекторию электронных потоков. При этом наблюдается увеличение уровня токоотбора.

Смещение управляющей сетки относительно многолучевого катода и анода на 0,03 мм. вносит существенное изменение траекторий электронных потоков. Уровень токоотбора при этом практически не изменился. Результат расчета траекторий движения заряженных частиц в многолучевой пушке при смещении управляющей сетки относительно катода и анода представлен на рисунке 2.

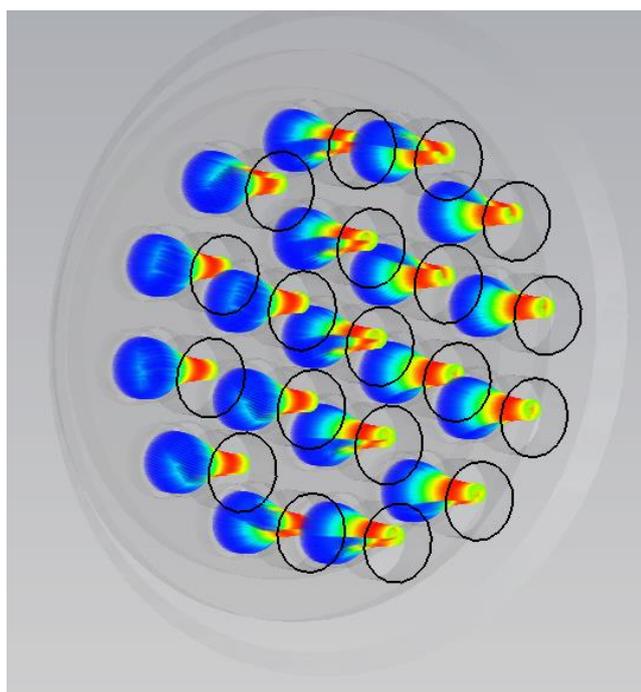


Рис. 2. Результат расчета траекторий движения заряженных частиц в многолучевой пушке при смещении управляющей сетки относительно катода и анода на 0,03 мм.

Дополнительный поворот управляющей сетки на  $0,5^\circ$  при сохранении смещения относительно многолучевого катода и анода на 0,03 мм. не внес заметного изменения траекторий электронных потоков. Уровень токоотбора, при этом увеличился на 8,8%, относительно случая без отклонений управляющей сетки.

### Библиографический список

1. *Калашников, Д.* АО "НПП "Торий". Электроника больших мощностей / Д. Калашников // Электроника: Наука, технология, бизнес. – 2022. – № 6(217). – С. 58-63. – DOI 10.22184/1992-4178.2022.217.6.58.62. – EDN CDWBHV.
2. *Пугнин В.И.* Проблемы создания мощных широкополосных многолучевых клистронов / В.И. Пугнин, А.Н. Юнаков. Радиотехника. 2004. №2. С. 17-21.
3. *Studio C. S. T. M.* CST Studio Suite //Computer Simulation. – 2010.

## Содержание

<b>О.Р. Абрамов, Р.А. Торгашов, В.Н. Титов</b> Разработка миниатюрной лбв w-диапазона с зс типа сдвоенная гребенка и ленточным электронным пучком запаздывания на взаимную синхронизацию мощных гиротронов, связанных с задержкой.....	6
<b>Ю.В. Александрова, А.В. Садовников, Е.Н. Бегинин</b> Прохождение спиновых волн в двухслойных волноводах с магнитными неоднородностями в режиме однонаправленного распространения.....	8
<b>А.А. Андреев, Е.А. Рябов, Б.В. Сергеева, В.Н. Гусятников</b> Исследование диэлектрической проницаемости жидких диэлектриков в X-диапазоне частот .....	10
<b>Э.Р. Багаутдинова, П.В. Купцов, Н.В. Станкевич</b> Исследование динамики линейно связанных осцилляторов на основе формализма Ходжкина-Хаксли с использованием искусственных нейронных сетей .....	12
<b>В.В. Балаева, Д.В. Романенко, М.А. Морозова</b> Пространственная перекачка спиновых волн в связанных магнетонных кристаллах .....	14
<b>А. С. Банникова, М. Ю. Морозов</b> Диффузионная накачка графена на экранированной подложке.....	15
<b>П.В. Барков, М.М. Слепченков, О.Е. Глухова</b> Закономерности протекания тока в пленках перфорированного графена, функционализированного карбонильными и карбоксильными группами.....	17
<b>А.А. Бурцев, А.А. Невзоров, В.А. Михалевский, А.В. Киселев, В.В. Ионин, А.А. Лотин</b> Анализ кинетики кристаллизации тонких пленок фазоизменяемых материалов .....	20
<b>Д.Н. Бухаров, С.М. Лаврентьев</b> Компьютерное моделирование структуры лазерно-индуцированной графитизированной области в алмазе .....	22
<b>Д.Н. Бухаров, В.Д. Самышкин, А.Ф. Лелекова</b> Моделирование структуры системы микросвитков диоксида титана, допированного золотыми наночастицами .....	24
<b>Д.В. Васильева</b> Исследование нестационарности variability сердечного ритма у здоровых добровольцев и пациентов с нарушением вегетативной регуляции кровообращения.....	26
<b>М.Ю. Васильков, С.С. Волчков, Н.М. Ушаков</b> Двухслойные антиотражающие нанопокртия для стеклянных пластин на основе оксидов кремния и цинка.....	30
<b>А.М. Вахлаева, Ю.М. Ишбулатов, А.С. Караваев, В.И. Пономаренко</b> Применение искусственной нейронной сети для диагностики направленной связи между осцилляторами ван дер Поля в присутствии измерительных шумов .....	32

<b>И.С. Великанов, Н.В. Короневский, И.В. Хайрушев, В.И. Гукова, Б.В. Сергеева</b> Изучение влияния параметров минерализации на морфологию поверхности композитного материала .....	34
<b>С.С. Волчков, Е.В. Ушакова, Н.М. Ушаков, Д.А. Зимняков</b> Нелинейно-оптические и сенсорные свойства вспененных флуоресцирующих полимерных матриц. Перспективы и проблемы прикладных применений .....	36
<b>Ф.Е. Гаранин, В.А. Губанов, А.В. Садовников</b> Связанные спиновые волны в нерегулярных магнонных структурах на основе латеральных жиг микро-волноводов трапецевидной формы.....	38
<b>С.А. Гетманов, А.В. Садовников</b> Система демультимплексора на основе спиновых волн при их распространении в латеральной структуре четырёх кольцевых резонаторов .....	40
<b>И.А. Глухов, С.Г. Моисеев</b> Поглощение световой волны диэлектрической пленкой с монослоем металлических наночастиц .....	42
<b>М.О. Журавлёв, А.Е. Руннова, А.Р. Киселев, О.М. Драпкина</b> Новая методика детектирования сердечного ритма в сильно зашумленных сигналах ЭКГ и ФПГ .....	44
<b>М.О. Журавлёв, А.Е. Руннова, А.Р. Киселев, М.А. Симонян, О.М. Драпкина</b> Исследование особенностей в электрической активности головного мозга при синдроме обструктивного апноэ сна .....	46
<b>Ю.М. Ишбулатов, О.С. Тарасова, А.С. Боровик, А.М. Вахлаева, Б.П. Безручко, А.С. Караваев</b> Реконструкция модельного уравнения системы регуляции среднего артериального давления крысы по экспериментальным данным .....	48
<b>А.А. Казанков, В.А. Сергеев, И.В. Фролов, О.А. Радаев</b> Исследование люминесценции фотодиодных структур в режиме электрического пробоя .....	50
<b>П.В. Квасневская</b> Метод исследования контуров вегетативной регуляции кровообращения на основе анализа статистических свойств разностей мгновенных фаз.....	52
<b>В.С. Климин</b> Элементы сорбционной сенсорики на основе графеноподобной пленки .....	55
<b>В.С. Климин</b> Формирование метаструктур на поверхности кремния комбинированной фторидной газоразрядной плазмой .....	57
<b>Е.Е. Колесниченко, А.А. Ростунцова, Н.М. Рыскин</b> Моделирование системы согласования для лампы бегущей волны субтерагерцевого диапазона с лестничной замедляющей системой .....	59
<b>Н.В. Короневский, И.С. Великанов, А.А. Андреев, Б.В. Сергеева</b> Исследования процесса перекристаллизации микрочастиц ватерита, выращенных на волокнах полика-пролактона, в кальцит .....	61
<b>В.А. Краснова, Т.Б. Иванова</b> Исследование управляемого движения роллер рейсера.....	63

<b>Д.А. Крылосова, П.В. Купцов, А.П. Кузнецов, Н.В. Станкевич</b> Система Фитцхью-Нагумо под внешним воздействием с адаптивной фазой сигнала.....	65
<b>А.П. Кузнецов, Ю.В. Седова, Н.В. Станкевич</b> Динамика связанных дискретных нейронов квалво .....	67
<b>П. В. Купцов</b> Моделирование нейроморфной динамикой при помощи нейронных сетей .....	69
<b>А.В. Курбако, Д.М. Ежов, М.Д. Прохоров, В.И. Пономаренко</b> Распознавание паттернов на изображениях с помощью спайковой нейронной сети с малым количеством нейронов .....	70
<b>Д.А. Лагунов, Е.М. Артемова</b> Влияние неоднородного начального поля скорости на расчеты двумерных течений жидкости.....	72
<b>Н. Д. Лобанов, О. В. Матвеев, М. А. Морозова</b> Частотная перестройка запрещенных зон спиновых волн с помощью спинового тока .....	74
<b>Д.О. Любченко, А.В. Савин</b> Экстремальная мультистабильность в диссипативном отображении под управлением гамильтоновой системы.....	76
<b>Д.А. Мальцев, И.Н. Михайлов, Ю.В. Никулин, М.Ю. Васильков, С.С. Волчков, Н.М. Ушаков</b> Оптические свойства композитных мембран нанопористого анодного оксида алюминия .....	78
<b>Р.В. Маслий, А.В. Садовников</b> Исследование режимов распространения спиновой волны в латерально связанных волноводах с ортогональным элементом .....	80
<b>И. М. Моисеенко, Д. В. Фатеев</b> Уменьшение затухания поверхностной волны в графене за счет постоянного электрического тока.....	82
<b>Л.Н. Мокрушина, Е.В. Ветчанин</b> Анализ влияния вихревых структур на движение тела с острой кромкой.....	84
<b>Е.С. Молякова, Д.Л. Шалашова, М.В. Рахматулин, И.О. Чигуров</b> Влияние тепловых режимов на функционирование электронно-оптической системы лбв с радиационным охлаждением в динамическом режиме работы .....	87
<b>В.А. Мошков, А.А. Грачев, А.В. Садовников</b> Эффекты межволноводной связи в системе ортогональных жиг микроволноводов с резонатором .....	90
<b>И.С. Ожогин, Н.М. Рыскин, А.А. Сердобинцев, И.О. Кожевников, А.В. Стародубов</b> Разработка электродинамических структур для вакуумной электроники субтгц диапазона с использованием dlr 3D-печати и магнетронного распыления.....	93
<b>А.А. Петрунин, О.Е. Глухова</b> Роль окислительно-восстановительных реакций при детектировании спиртов и кетонов газовым сенсором на основе $SnO_2$ . Dft исследование .....	95
<b>Ф.П. Разуваев, И.П. Медведков, И.А. Чистяков</b> Численное 3D моделирование распространения электронного потока в двухступенчатом коллекторе с нарушением аксиальной симметрии в составе мощной лбв Ku(k)-диапазона .....	97

<b>А.А. Ростунцова</b> Автомоделный характер генерации импульсов сверхизлучения в лазерах на свободных электронах с электромагнитной накачкой.....	99
<b>А.Е. Руннова, М.О. Журавлев, Н.С. Акимова</b> Явление перемежаемости в ночных записях ЭЭГ и ЭКГ сигналах на основной частоте ритма сердца.....	101
<b>А.О. Сельский, Е.П. Емельянова, Е.Е. Дрождева</b> Рекуррентный анализ данных ээг пациентов после ортодонтического воздействия .....	104
<b>С.В. Середич, А.А. Андреев, Е.А. Рябов</b> Влияние диафрагмы на спектр пропускания полосно-пропускающего фильтра в x-диапазоне частот.....	106
<b>Д.А. Сидоров, А.В. Суховерхий, А.А. Цуканов</b> Разработка вывода энергии усилителя м-типа W-диапазона .....	108
<b>М.А. Симонян, Е.Е. Дрождева, А.С. Реджепова, Ю.А. Журавлева</b> Частотно-временные характеристики сигналов ночной ЭЭГ в различных отделах мозга в зависимости от хронотипа .....	110
<b>М.М. Слепченков, П.В. Барков, О.Е. Глухова</b> Электрофизические свойства графен-нанотрубных гибридных пленок различной топологии .....	112
<b>Д.А. Солодянкин, Е.М. Артемова</b> Динамика движения двух вихрей в ограниченной области.....	115
<b>Р.А. Торгашов</b> Разработка двухлучевой низковольтной ЛБВ с планарной замедляющей системой на диэлектрической подложке .....	116
<b>Н.А. Трунилин, Р.К. Яфаров</b> Исследование газовой чувствительности алмазографитовых пленочных структур к парам ацетона .....	118
<b>К.В. Машинский, В.В. Попов, Д.В. Фатеев</b> Возбуждение плазмонных мод, локализованных на краю ограниченного графенового прямоугольника .....	120
<b>А.Р. Шабаетва</b> Биомаркеры ишемической болезни сердца, основанные на анализе формы st-сегмента электрокардиограммы .....	122
<b>М.Е. Селезнев, Ю.В. Никулин, С.Л. Высоцкий, Ю.В. Хивинцев, А.В. Кожевников, В.К. Сахаров, Ю.А. Филимонов</b> Спиновая накачка бегущими пмсв в структуре жиг/рт на основе пленки жиг с пониженной намагниченностью .....	125
<b>В.К. Сахаров, Ю.В. Хивинцев, Ю.А. Филимонов</b> Особенности спектра спиновых волн в решётке связанных микрополосок из $Y_3Fe_5O_{12}$ с неоднородным распределением намагниченности по толщине .....	127
<b>В.К. Сахаров, Ю.В. Хивинцев, С.Л. Высоцкий, Г.М. Дудко, Ю.А. Филимонов</b> Особенности спектра поверхностной магнитостатической волны, распространяющейся в субволновых структурах из плёнок $Y_3Fe_5O_{12}$ (111)....	129
<b>Г.М. Амаханов, Ю.В. Никулин, С.Л. Высоцкий, Ю.В. Хивинцев, А.В. Кожевников, М.Е. Селезнев, В.К. Сахаров, Ю.А. Филимонов</b> Исследование спиновой накачки с помощью обратного спинового эффекта холла в микроструктурах жиг/рт на основе пленки жиг (100) .....	131
<b>А. А. Тучин, А. В. Купцова, П. В. Купцов</b> Выявление режима скрытых колебаний в системе осциллятора ван дер поля с пассивной нагрузкой.....	133

<b>И.В. Фролов, О.А. Радаев, В.А. Сергеев, С.А. Зайцев</b> Оценка качества и надежности InGaN/GaN светодиодов и светодиодных матриц по крутизне ватт-амперной характеристики.....	134
<b>И.О. Фильченков, В.А. Зюзин А.В. Садовников</b> Влияние жиг-резонатора на распространение спиновых волн в зигзагообразной структуре.....	136
<b>А.П. Кузнецов, Л.В. Тюрюкина</b> Взаимодействие хаотической системы и системы с многочастотной квазипериодичностью .....	138
<b>И.А. Чистяков, Д.Н. Золотых, И.П. Медведков</b> Использование pseven в решении задач оптимизации-электронно-волнового взаимодействия применительно к лбв о-типа.....	140
<b>Г.М. Амаханов, С.Л. Высоцкий, М.Е. Селезнев, Ю.В. Никулин</b> Обратный спиновый эффект холла в структуре «магнетонный кристалл – платина» в малых полях подмагничивания .....	142
<b>В.А. Ханадеев, О.И. Москаленко</b> Перемежающаяся обобщенная синхронизация в однонаправленно связанных системах с запаздыванием.....	143
<b>Д.Л. Шалашова, М.В. Рахматулин, Е.С. Молякова, И.О. Чигуров</b> Оценка влияния отклонений управляющей сетки многолучевой электронной пушки на уровень токопрохождения.....	145

Научное издание

**«НАНОЭЛЕКТРОНИКА, НАНОФОТОНИКА  
И НЕЛИНЕЙНАЯ ФИЗИКА»**

Сборник докладов XIX Всероссийской конференции молодых ученых

(Саратов, 8 – 9 октября 2024 г.)

Издается в авторской редакции

Оригинал-макет подготовили *Д. В. Фатеев, М. Е. Селезнёв*

---

подписано в печать 25.09.2024. Формат А5. Бумага офсетная.

Гарнитура Times. Усл. печ. л. 6,65 (7,25).

Тираж 70 экз. Заказ 39150.

---

Издательство “Техно-Декор”.

Саратов, Московская, 160.

Тел.: (8452) 77-08-48

[t-d@list.ru](mailto:t-d@list.ru)    [sar-print.ru](http://sar-print.ru)