

Саратовский национальный исследовательский государственный  
университет имени Н.Г.Чернышевского

**НАНО- И БИОМЕДИЦИНСКИЕ  
ТЕХНОЛОГИИ.  
УПРАВЛЕНИЕ КАЧЕСТВОМ.  
ПРОБЛЕМЫ И ПЕРСПЕКТИВЫ.**

*Посвящается 100-летию физико-математического  
образования в Саратовском государственном  
университете им. Н.Г. Чернышевского*

Сборник научных статей

Выпуск 2

Под редакцией профессора С.Б.Венига

Саратов, 2018

УДК [620.3+61:57] (082)

ББК 30я43 + 5я43

Н 25

ISBN 978-5-6040675-8-1

**Нано- и биомедицинские технологии. Управление качеством. Проблемы и перспективы.** Сборник научных статей./ редакторы: О.Ю.Кондратьева, Д.В.Терин, Е.М.Ревзина; отв. ред. д.ф.-м.н. проф. С.Б.Вениг. – Саратов, СГУ 2018. Вып.2 - 218 с.: ил

В сборнике представлены материалы, отражающие различные научно-практические, методические направления деятельности, преподавателей, сотрудников и студентов факультета нано- и биомедицинских технологий Саратовского национального исследовательского государственного университета имени Н.Г. Чернышевского: физика, электроника и наноэлектроника, материаловедение и технологии материалов, биотехнические системы и технологии, управление качеством, инноватика.

Сборник будет полезен для научных, инженерно-технических работников предприятий и научно-исследовательских организаций, а также аспирантов и студентов старших курсов соответствующих направлений подготовки.

Редакционная коллегия:

доктор физико-математических наук, профессор С.Б.Вениг (отв.редактор),  
редакторы - О.Ю.Кондратьева, к.ф.-м.н., доцент Д.В.Терин,  
к.ф.-м.н. Е.М.Ревзина,

© 2018, СГУ

## СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	7
<b>Электроника и микроэлектроника</b>	
<i>Андреев А.С., Названов В.Ф.</i> ОПТИЧЕСКИЕ СПЕКТРЫ ОТРАЖЕНИЯ СТРУКТУР С ПОВЕРХНОСТНЫМИ ПЛАЗМОНАМИ, ВОЗБУЖДЕННЫМИ НА ГРАНИЦЕ МЕТАЛЛА С УСИЛИВАЮЩЕЙ СРЕДОЙ	8
<i>Андреев А.С., Названов В.Ф.</i> ПОВЕРХНОСТНЫЕ ПЛАЗМОНЫ - ПОЛЯРИТОНЫ НА ГРАНИЦЕ ДИЭЛЕКТРИКА И ГЕТЕРОГЕННОЙ СРЕДЫ С МЕТАЛЛИЧЕСКИМИ НАНОЧАСТИЦАМИ	13
<i>Гимадеев Н.Ш., Названов В.Ф.</i> СПЕКТРЫ СЕЧЕНИЙ ПОГЛОЩЕНИЯ И РАССЕЯНИЯ ДВУХСЛОЙНЫХ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ НАНОЧАСТИЦ С ОБОЛОЧКОЙ ИЗ УСИЛИВАЮЩЕЙ ГЕТЕРОГЕННОЙ СРЕДЫ МЕТАЛЛ – ДИЭЛЕКТРИК	19
<i>Кабанов В.Ф., Глуховской Е.Г., Шишкин М.И.</i> ЭЛЕКТРОННЫЕ ПРОЦЕССЫ В НАНОЧАСТИЦАХ СУЛЬФИДА СВИНЦА В МУЛЬТИЗЁРЕННОЙ СТРУКТУРЕ	25
<i>Кожевников И.О., Ревзина Е.М., Кондратьева О.Ю., Терин Д.В.</i> МОДЕЛИРОВАНИЕ ДИНАМИКИ ПРОЦЕССОВ В МНОГОСЛОЙНЫХ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ СТРУКТУРАХ ПРИ ВНЕШНИХ ВОЗДЕЙСТВИЯХ	31
<i>Колесникова А.С., Кондратьева О.Ю., Терин Д.В.</i> МОДЕЛИРОВАНИЕ КОМПОЗИЦИОННЫХ ПОКРЫТИЙ ДЛЯ ДАТЧИКОВ ДАВЛЕНИЯ	34
<i>Максина Д.А., Названов В.Ф.</i> СПЕКТРЫ ОТРАЖЕНИЯ ОДНОМЕРНЫХ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ФОТОННЫХ КРИСТАЛЛОВ С ДЕФЕКТНЫМ СЛОЕМ ИЗ АКТИВНОЙ ГЕТЕРОГЕННОЙ СРЕДЫ МЕТАЛЛ – ДИЭЛЕКТРИК	38
<i>Михайлов А.И., Кабанов В.Ф., Гавриков М.В.</i> МЕТОДИКА АНАЛИЗА ПАРАМЕТРОВ НАНОЧАСТИЦ ПОЛУПРОВОДНИКОВ ГРУППЫ АЗВ5	43
<i>Михайлов А.И., Митин А.В., Кожевников И.О.</i> ГАННОВСКАЯ И РЕКОМБИНАЦИОННАЯ НЕУСТОЙЧИВОСТИ ТОКА В ВЫСОКООМНЫХ МНОГОДОЛИННЫХ ПОЛУПРОВОДНИКАХ В УСЛОВИЯХ ОПТИЧЕСКОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ: МОДЕЛИРОВАНИЕ, ОСНОВНЫЕ СВОЙСТВА, ПРИМЕНЕНИЕ	49

<i>Михайлов А.И., Сергеев С.А.</i>	61
ВОЛНОВЫЕ ПРОЦЕССЫ В ТВЕРДЫХ ТЕЛАХ И ИХ ИСПОЛЬЗОВАНИЕ В ЭЛЕКТРОНИКЕ	
<i>Названов В.Ф.</i>	64
ПОВЕРХНОСТНЫЕ ЭКСИТОН – ПОЛЯРИТОНЫ С БОЛЬШОЙ ДЛИНОЙ РАСПРОСТРАНЕНИЯ В ТОНКИХ ПЛЕНКАХ ДВУОКИСИ	
<i>Роках А.Г.</i>	69
ИССЛЕДОВАНИЕ ФОТОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ И РАДИАЦИОННЫХ ЯВЛЕНИЙ В ПОЛУПРОВОДНИКАХ В САРАТОВСКОМ УНИВЕР- СИТЕТЕ	
<i>Сергеев С.А., Короневский Н.В., Сергеев Р.С.</i>	75
ТЕХНОЛОГИЯ ПОЛУЧЕНИЯ МИКРОЧАСТИЦ КАРБОНАТА КАЛЬЦИЯ, МОДИФИЦИРОВАННЫХ НАНОЧАСТИЦАМИ МАГНЕТИТА, НА НЕОРГАНИЧЕСКИХ ВОЛОКНАХ	
<i>Сергеев С.А., Михайлов А.И., Сергеева Б.В.</i>	79
НОВЫЕ ФУНКЦИОНАЛЬНЫЕ МАТЕРИАЛЫ ДЛЯ УСТРОЙСТВ НА ВОЛНАХ ПРОСТРАНСТВЕННОГО ЗАРЯДА	
<i>Тихонов В.В.</i>	86
СПИН-ВОЛНОВЫЕ ВОЗБУЖДЕНИЯ В ПЛЕНОЧНЫХ СТРУКТУРАХ ЖЕЛЕЗОИТТРИЕВЫХ ГРАНАТОВ	
<b><i>Материаловедение</i></b>	
<i>Вениг С.Б., Чернова Р.К., Сержантов В.Г., Шаповал О.Г., Сплюхин В.П., Селифонова Е.И., Наумова Г.Н., Щербакова Н.Н.</i>	91
БАКТЕРИЦИДНЫЕ СВОЙСТВА НЕКОТОРЫХ КОМПОЗИТОВ НА ОСНОВЕ ГЛАУКОНИТА	
<i>Климова С.А.</i>	97
МИКРО- И НАНОСТРУКТУРНЫЕ МАТЕРИАЛЫ С ФУНКЦИОНАЛЬНЫМИ СВОЙСТВАМИ ДЛЯ ФОТОЭФФЕКТИВНЫХ УСТРОЙСТВ	
<i>Климова С.А.</i>	103
МИКРО- И НАНОСТРУКТУРНЫЕ МАТЕРИАЛЫ С ФУНКЦИОНАЛЬНЫМИ СВОЙСТВАМИ ДЛЯ ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНЫХ УСТРОЙСТВ	
<i>Кондратьева О.Ю., Терин Д.В., Корчагин С.А., Кондратьева Е.В.</i>	109
ОБРАБОТКА СЭМ ИЗОБРАЖЕНИЙ ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПОРОГА ПРОВОДИМОСТИ	

*Симаков В.В., Осыко И.Д., Суханов В.А., Синёв И.В.* 114  
ВЛИЯНИЕ ПАРОВ ВОДЫ НА ПРОВОДИМОСТЬ ТОНКОЙ ПЛЕНКИ  
ДИОКСИДА ОЛОВА В УСЛОВИЯХ ОСВЕЩЕНИЯ ПРИ КОМНАТНОЙ  
ТЕМПЕРАТУРЕ

*Симаков В.В., Суханов В.А.* 118  
ВОЛЬТАМПЕРНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ГАЗОЧУВСТВИТЕЛЬНЫХ  
СТРУКТУР НА ОСНОВЕ ПОЛИКРИСТАЛЛИЧЕСКИХ ПЛЕНОК  
ДИОКСИДА ОЛОВА

*Смирнов А.В., Аткин В.С., Горбунова А.В.* 122  
ФОРМИРОВАНИЕ МЕТАЛЛ-ПОЛИМЕРНОГО  
ФУНКЦИОНАЛЬНОГО ПОКРЫТИЯ

*Тимошенко Д. А., Осыко И. Д., Симаков В. В., Синёв И. В.* 125  
ЗОЛЬ-ГЕЛЬ МЕТОД ПОЛУЧЕНИЯ ГАЗОЧУВСТВИТЕЛЬНЫХ ПРИ  
КОМНАТНОЙ ТЕМПЕРАТУРЕ ПЛЕНОК ДИОКСИДА ОЛОВА

*Федоренко В.А., Богомолов А.С.* 129  
ОЦЕНКА УНИКАЛЬНОСТИ КОМПЛЕКСОВ ТРАСС,  
СОВПАДАЮЩИХ В

### **Биомедицинские технологии**

*Боровкова Е.И., Киселев А.Р., Безручко Б.П.* 133  
СИНХРОНИЗАЦИЯ ХАОТИЧЕСКОГО ГЕНЕРАТОРА С  
ЗАПАЗДЫВАЮЩЕЙ ОБРАТНОЙ СВЯЗЬЮ В РАДИОФИЗИЧЕСКОМ  
ЭКСПЕРИМЕНТЕ МОДУЛИРОВАННЫМ ПО ЧАСТОТЕ СИГНАЛОМ

*Ишбулатов Ю.М., Безручко Б.П.* 139  
МОДЕЛЬ СЕРДЕЧНО-СОСУДИСТОЙ СИСТЕМЫ ЧЕЛОВЕКА С  
АВТОНОМНЫМ КОНТУРОМ РЕГУЛЯЦИИ СРЕДНЕГО  
АРТЕРИАЛЬНОГО ДАВЛЕНИЯ

*Кульминский Д.Д., Киселев А.Р., Безручко Б.П.* 145  
УСТРОЙСТВО ДЛЯ ОЦЕНКИ ФУНКЦИОНАЛЬНОГО СОСТОЯНИЯ  
СЕРДЕЧНО-СОСУДИСТОЙ СИСТЕМЫ НА ОСНОВЕ КОНТРОЛЯ  
СИНХРОНИЗАЦИИ ЕЕ РИТМОВ

*Садчикова К.А., Добдин С.Ю., Рабичев И.Э.* 148  
ИССЛЕДОВАНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК ЖИДКОКРИСТАЛЛИЧЕСКИХ  
СТЕКЛОЛ, ПРИМЕНЯЕМЫХ В ОФТАЛЬМОЛОГИИ

*Сказкина В.В., Безручко Б.П.* 153  
ОЦЕНКА СИНХРОНИЗОВАННОСТИ РИТМОВ ВЕГЕТАТИВНОЙ  
РЕГУЛЯЦИИ СЕРДЦА И СОСУДОВ ПО ДЛИТЕЛЬНЫМ ВРЕМЕННЫМ  
РЯДАМ

*Хорев В.С., Киселев А.Р., Безручко Б.П.* 157  
ОЦЕНКА ОСОБЕННОСТЕЙ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ МЕЖДУ  
ПОДСИСТЕМАМИ РЕГУЛЯЦИИ ВАРИАбельНОСТИ RR-  
ИНТЕРВАЛОВ И КРОВЕНАПОЛНЕНИЯ ДИСТАЛЬНЫХ СОСУДОВ

***Управление качеством, инноватика***

*Асташина А.М, Боброва Е.В., Ляушин Р.М.* 162  
ПРОБЛЕМЫ КОММУНИКАЦИЙ В СОВРЕМЕННОЙ ОРГАНИЗАЦИИ  
И ПУТИ ИХ РЕШЕНИЯ

*Ждано М.М., Наумов Д.Д., Крылов С.Н., Ревзина Е.М.* 165  
ПРОБЛЕМЫ ВНЕДРЕНИЯ ИННОВАЦИЙ В ПРЕДПРИЯТИИ

*Крылов С.Н., Кондратьева О.Ю., Ревзина Е.М., Кондратьева Е.В.* 169  
ОПРЕДЕЛЕНИЕ УРОВНЯ ИННОВАЦИОННОГО РАЗВИТИЯ  
РЕГИОНОВ

*Табакowa И.В., Винокурова С.А.* 178  
ПРИМЕНЕНИЕ FMEA-АНАЛИЗА ДЛЯ РЕАЛИЗАЦИИ РИСК-  
ОРИЕНТИРОВАННОГО МЫШЛЕНИЯ

***Образование***

*Белобровая О.Я., Полянская В.П., Терин Д.В., Вениг С.Б.* 184  
ЛАБОРАТОРИЯ МИКРОЭЛЕКТРОНИКИ ВЧЕРА И СЕГОДНЯ

*Ворошилов С.А., Дубовская Е.Н., Коновалова А.Г.* 191  
ПОДГОТОВКА СПЕЦИАЛИСТОВ В ОБЛАСТИ КАЧЕСТВА В  
САРАТОВСКОМ УНИВЕРСИТЕТЕ

*Соловьева В.А.* 200  
РАЗЛИЧИЯ В ВОСПРИЯТИИ ИНФОРМАЦИИ НА ЭКРАНЕ –  
ФИЗИКИ И ЛИРИКИ

*Федоренко В.А.* 208  
ПОДГОТОВКА ЭКСПЕРТОВ-КРИМИНАЛИСТОВ НА ФАКУЛЬТЕТЕ  
НАНО И БИОМЕДИЦИНСКИХ ТЕХНОЛОГИЙ

## ВВЕДЕНИЕ

В 2017–2018 учебном году исполняется 100 лет с момента открытия в Саратовском университете физико-математического факультета – первой крупной образовательно-научной структуры Нижнего Поволжья и всего Юго-Востока Европейской части России по подготовке квалифицированных физиков и математиков. Выпуск университетом десятков тысяч специалистов физико-математического профиля, обладающих многогранным университетским образованием, обеспечивал и продолжает обеспечивать кадрами учреждения общего и высшего образования, важные научно-производственные и производственные предприятия региона.

Сегодня подготовка бакалавров, магистров и аспирантов в области математики, физики и информационных технологий проходит на 5 факультетах Саратовского государственного университета – физическом, механико-математическом, нелинейных процессов, компьютерных наук и информационных технологий, нано- и биомедицинских технологий. Эти факультеты являются центром развития и популяризации математических, физических, компьютерных знаний и технологий их преподавания в масштабах региона и страны. На факультетах сформировались признанные научно-образовательные школы международного уровня, развиваются прорывные научные проекты, в том числе с привлечением ведущих ученых мира.

Материалы настоящего сборника носят междисциплинарный характер, всецело отражающий всю многогранность, широту и творческую атмосферу факультета нано- и биомедицинских технологий, несущую значительный созидательный «заряд».

Сборник будет интересен студентам, обучающимся по направлениям: физика, электроника и наноэлектроника, материаловедение и технологии материалов, биотехнические системы и технологии, управление качеством, инноватика, а также магистрантам, аспирантам, инженерам и научным работникам, специализирующимся в области нано- и биомедицинских технологий.

# ЭЛЕКТРОНИКА И МИКРОЭЛЕКТРОНИКА

*А.С. Андреев, В.Ф. Названов*

Саратовский национальный исследовательский государственный университет имени Н.Г. Чернышевского

## **ОПТИЧЕСКИЕ СПЕКТРЫ ОТРАЖЕНИЯ СТРУКТУР С ПОВЕРХНОСТНЫМИ ПЛАЗМОНАМИ, ВОЗБУЖДЕННЫМИ НА ГРАНИЦЕ МЕТАЛЛА С УСИЛИВАЮЩЕЙ СРЕДОЙ.**

В представленной статье изложены результаты компьютерного моделирования спектральных зависимостей коэффициентов отражения слоистых структур с поверхностными плазмонами, возбужденными на границе металла с усиливающей средой. Рассмотрены случаи возбуждения поверхностных плазмонов на границе металла и диэлектрика с усилением, а также на границе металла и гетерогенной среды с усилением. При моделировании использовался метод матриц рассеяния. Показана существенная зависимость коэффициентов отражения от величины коэффициента усиления. В частности, показано, что наличие усиления в среде на границе с металлом приводит к значительному увеличению коэффициента отражения.

**Ключевые слова:** Поверхностные плазмоны, граница металла с усиливающей средой, гетерогенные среды на основе диэлектрической матрицы с металлическими включениями.

### **Введение**

В последнее время интерес к структурам на основе поверхностных плазмонов значителен в вследствие возможности их широкого практического применения в различных областях деятельности, к примеру, в оптике, сенсорике и т.д.[1].

Особенное внимание привлекают к себе структуры, содержащие слои с усилением. Это связано с возникновением эффекта лазерного излучения в структурах с поверхностными плазмонами вследствие компенсации абсорбционных потерь поверхностных плазмонов и их усиления на границе металла с усиливающей средой[1 – 3].

**Оптические спектры отражения структур с поверхностными плазмонами, возбуждаемыми на границе металла и диэлектрика с усилением**

В данной работе проведено компьютерное моделирование спектра отражения в



зависимости от угла падения света 5-ти слойной структуры стекло – слой диэлектрика с усилением – слой серебра – слой диэлектрика с усилением – воздух (режим возбуждения поверхностных плазмонов с большой длиной распространения). Расчеты проведены в пакете прикладных программ Matchad 14 с использованием метода матриц рассеяния [1].

### Результаты моделирования

Результаты моделирования оптического спектра указанной выше структуры при различных значениях коэффициента усиления представлены на рисунке 1.

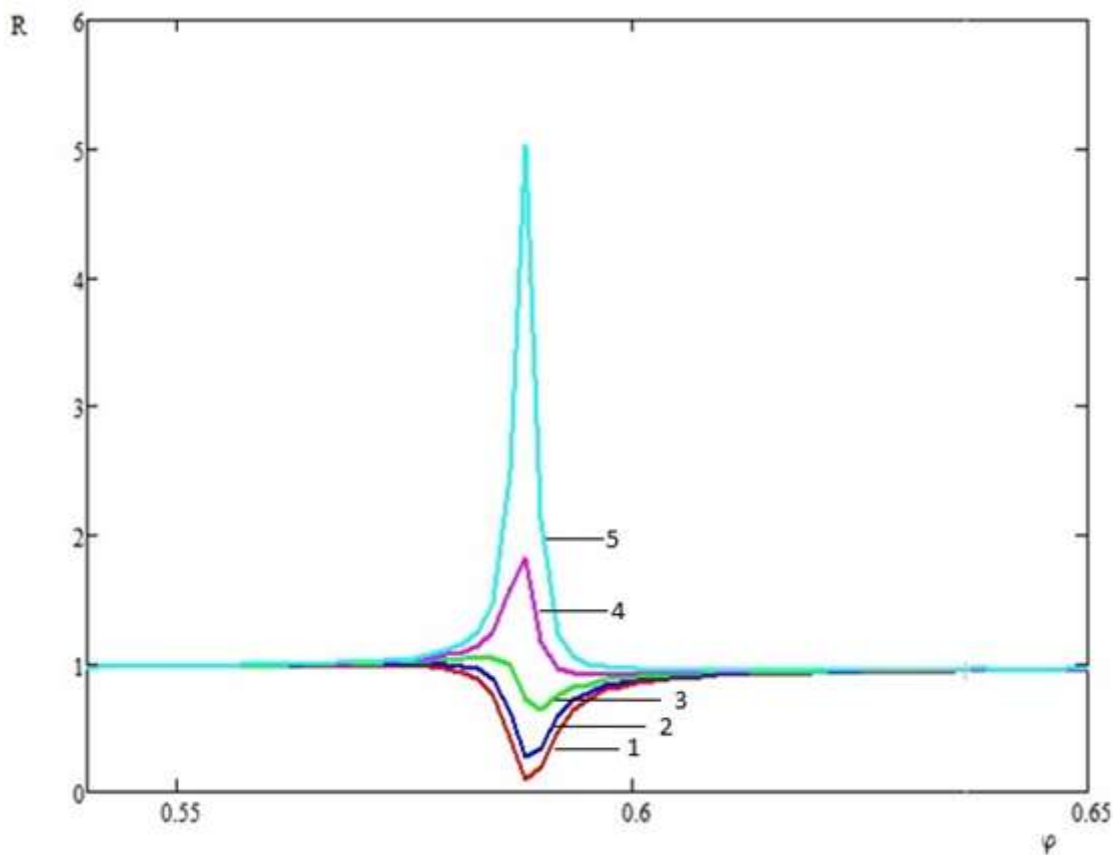


Рисунок 1. Зависимость коэффициента отражения  $R$  от угла падения  $\varphi$  для структуры с усиливающими слоями диэлектрика при различных значениях параметра ( $\kappa_c$ ), характеризующего усиление (1-  $\kappa_c=0,01$ ; 2-  $\kappa_c=0,02$ ; 3-  $\kappa_c=0,03$ ; 4-  $\kappa_c=0,04$ ; 5-  $\kappa_c=0,05$ )

Как можно видеть, наличие усиливающих свойств диэлектрика приводит к большому усилению отраженного излучения. При угле падения, соответствующем плазмонному резонансу, вместо минимума в спектре отражения, характерного для структур без усиления, обнаруживается

увеличение коэффициента отражения. В ходе моделирования выявлено, что максимальное значение достигается при величине параметра  $k_c=0,08$ .

### **Оптические спектры структур с поверхностными плазмонами, возбуждаемыми на границе металла и слоя гетерогенной среды с усилением**

Весьма интересен случай возбуждения поверхностных плазмонов на границе металла с усиливающей гетерогенной средой.

Как известно [4,5], так называемая гетерогенная (композитная) среда состоит из диэлектрика с металлическими наночастицами, которые распределены равномерно по всему объему. Авторами указанных работ предсказано возникновение резонансного аномально высокого показателя преломления, коэффициента экстинкции, поглощения и усиления. Действительная часть диэлектрической проницаемости среды изменяется в достаточно больших пределах. Появление высокого коэффициента усиления возможно из-за возникновения плазмонного резонанса наночастиц металла. Частота резонанса зависит от геометрии и размера частиц. Следует отметить, что оптические характеристики исходных материалов резонансных особенностей не имеют. В работах предложены идеи создания на базе гетерогенных сред материалов с управляемыми характеристиками. Например, возможно создание линз, фокусным расстоянием которых можно управлять изменением коэффициента усиления. Также за счет возможности достижения высокого коэффициента усиления могут создаваться лазерные элементы сверхмалых размеров.

Диэлектрическая проницаемость композитных сред может быть вычислена по формуле Максвелла – Гарнета при условии небольших факторов заполнения. Но существуют и другие способы вычисления. ( К примеру, в хорошо известен метод Бруггемана.) Если мы, например, имеем среду из металлических шаров, распределенных в матрице с диэлектрической проницаемостью  $\epsilon_m(\lambda)$ , то для диэлектрической функции гетерогенной среды можно записать:

$$\frac{\varepsilon_{mix}(\lambda) - \varepsilon_m(\lambda)}{\varepsilon_{mix}(\lambda) + 2 * \varepsilon_m(\lambda)} = \sum_j \eta_j * \frac{\varepsilon_{bj}(\lambda) - \varepsilon_m(\lambda)}{\varepsilon_{bj}(\lambda) + 2 * \varepsilon_m(\lambda)} \quad (1)$$

В представленной формуле величина  $\varepsilon_{bj}(\lambda) = \varepsilon'_{bj}(\lambda) + i * \varepsilon''_{bj}(\lambda)$  есть диэлектрическая проницаемость материала шаров j-го сорта.  $\eta_j$ - фактор заполнения, т. е, относительный объем, который занимают шары в смеси. Если

ввести обозначение  $F(\lambda, \eta) = \eta * \frac{\varepsilon_b(\lambda) - \varepsilon_m(\lambda)}{\varepsilon_b(\lambda) + 2 * \varepsilon_m(\lambda)}$ , то диэлектрическая

проницаемость гетерогенной смеси из шаров одного сорта запишется в виде:

$$\varepsilon_{mix}(\lambda) = \varepsilon_m \frac{(1 + 2 * F(\lambda, \eta))}{(1 - F(\lambda, \eta))} \quad (2)$$

Из формулы видно, что существует сильная зависимость диэлектрической проницаемости смеси от длины волны и фактора заполнения, а также возможность управления ее величиной. При создании управляемых оптических устройств этот факт имеет огромное значение.

Для диэлектрической проницаемости металлических наночастиц в расчете гетерогенных систем используются соотношения аппроксимации Друде с эмпирическими постоянными [ 1 ] .

Большому показателю преломления смеси соответствует большое поглощение. Неслучайно из-за высокого поглощения в пассивной гетерогенной среде авторы [4,5] рекомендуют исследовать слои толщиной менее длины волны излучения либо использовать отраженное излучение, например, по методу эллипсометрии. С этой точки зрения, по нашему мнению, исследование подобных гетерогенных сред в многослойных структурах с поверхностными плазмонами вполне оправдано [1] .

В связи со сказанным встает вопрос о необходимости компенсации поглощения света в таких структурах. Для этой цели можно использовать активные среды (с усилением) в качестве матриц (к примеру, лазерные). Диэлектрическая проницаемость для лазерной среды может записываться в виде [ 5 ] :

$$\varepsilon_m(\lambda) = n_m^2 - g^2 - 2 * i * n_m * g \quad , \quad (3)$$

где  $n_m$  - показатель преломления для лазерной среды;  $g = 2\pi / \kappa_c$  - приведенный коэффициент усиления.

Все вышеперечисленные формулы из работ [4-5] использовались нами при моделировании структуры следующей конфигурации: стекло – слой диэлектрика (SiO<sub>2</sub>) – слой серебра – слой гетерогенной среды с усилением – ВОЗДУХ .

### **Результаты компьютерного моделирования спектров отражения в зависимости от длины волны излучения многослойных структур с поверхностными плазмонами**

Результаты расчета спектров отражения указанной структуры при различных коэффициентах усиления отображены на рисунке 2:

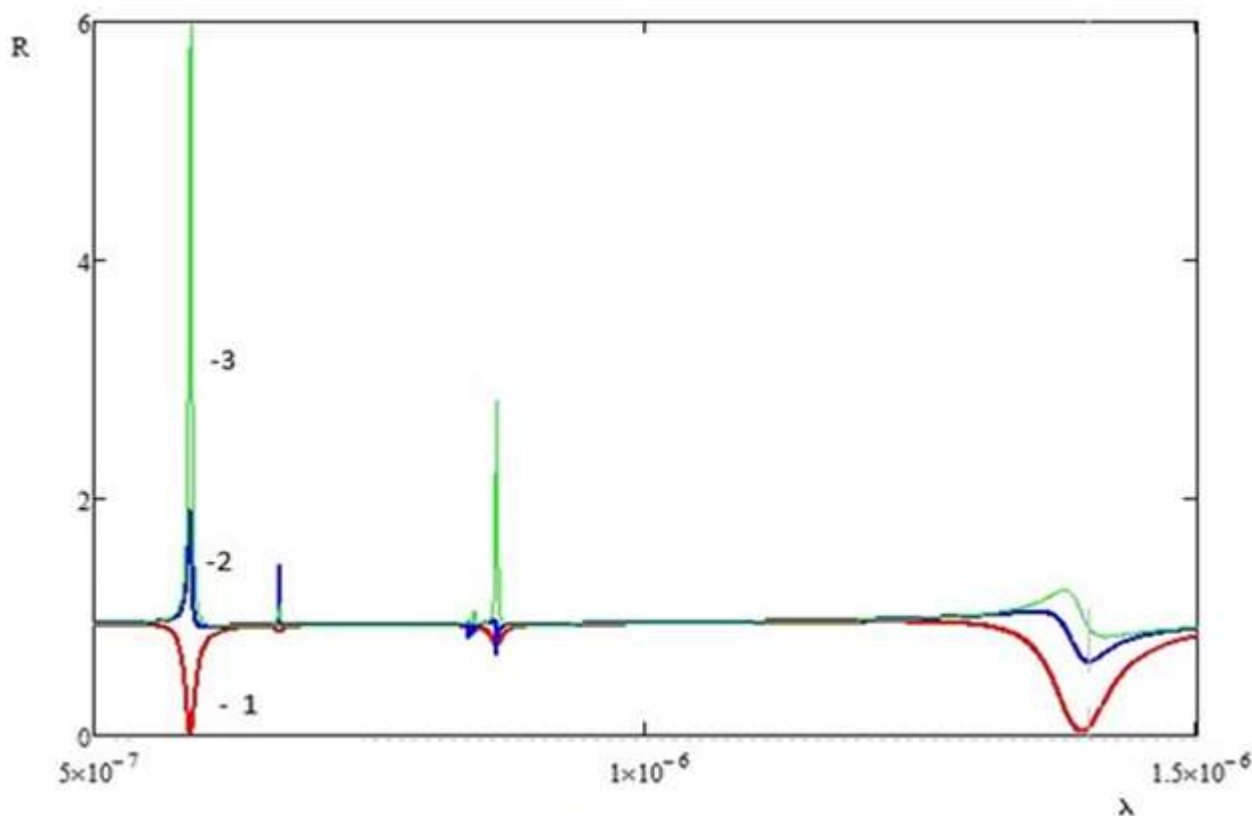


Рисунок 2. Зависимость коэффициента отражения R для структуры с усиливающим слоем гетерогенной среды от длины волны при различных значениях коэффициента усиления (фактор заполнения  $\eta=0.1322$ ): 1- $g=0$ ; 2- $g=0.027$ ; 3- $g=0.032$ .

Как видно из рисунка, по мере увеличения коэффициента усиления среды (при фиксированном значении фактора заполнения) в спектре отражения вместо минимума коэффициента отражения при резонансной длине волны наблюдается рост коэффициента отражения. Этот рост  $R$  происходит до определенного значения, затем наблюдается спад. В ходе моделирования выявлено, что «пороговым» является значение коэффициента усиления  $g=0.075$ .

### **Заключение**

Результаты компьютерного моделирования показали, что при наличии усиления в слоях диэлектрика на границе с металлом в структурах с поверхностными плазмонами можно достичь значительного возрастания коэффициента отражения как в зависимости от угла падения излучения при фиксированной длине волны, так и в зависимости от длины волны излучения при заданном угле падения излучения.

#### *Список использованной литературы*

1. Названов В.Ф. Наноплазмоника в наносенсорике и нанофотонике: учебное пособие – Саратов: изд. «Новый ветер», 2015. – 88 с.:илл.
2. Plotz G.A., Simon H.J. ., and Tucciarone J.M. Enhanced total reflection with surface plasmons. //J. Opt. Soc. Am., March 1979. Vol. 69. N 3.PP. 419 – 422.
3. Сударкин А.Н. , Демкович П. А. Возбуждение ПЭВ на границе металла с усиливающей средой. //ЖТФ. 1989. Т.59. Вып.7. С. 86 -
4. Ораевский А.Н., Проценко И.Е. Высокий показатель преломления и другие особенности оптических свойств гетерогенных сред.// Письма в ЖЭТФ. 2000. Т.72. Вып.9. С. 641-646
5. Ораевский А.Н., Проценко И.Е. Оптические свойства гетерогенных сред.// Квантовая электроника. 2001. Т.31. №3. С. 252-256.

***А.С. Андреев, В.Ф. Названов***

Саратовский национальный исследовательский государственный университет имени Н.Г. Чернышевского

### **ПОВЕРХНОСТНЫЕ ПЛАЗМОНЫ - ПОЛЯРИТОНЫ НА ГРАНИЦЕ ДИЭЛЕКТРИКА И ГЕТЕРОГЕННОЙ СРЕДЫ С МЕТАЛЛИЧЕСКИМИ НАНОЧАСТИЦАМИ**

В данной работе представлены результаты компьютерного моделирования коэффициента отражения р-поляризованного излучения в зависимости от угла падения в призме в конфигурации слоистой структуры диэлектрик – гетерогенная среда ( GaAs), содержащая сферические наночастицы металла (Ag), -диэлектрик, при возбуждении поверхностных плазмонов – поляритонов

при длине волны 800 нм.

**Ключевые слова:** металло-диэлектрические (гетерогенные среды), поверхностные плазмоны, возбуждаемые на границе диэлектрика и гетерогенной среды.

Введение.

В последние годы внимание исследователей привлекают так называемые гетерогенные (металло-диэлектрические) среды, состоящие из диэлектрика с равномерно распределенными по его объему металлическими наночастицами [1,2]. Свойства таких сред (ГС) включают как свойства объемного материала, так и свойства наночастиц. При этом эффективные материальные параметры ГС могут значительно отличаться от соответствующих характеристик как матрицы (как правило, диэлектрика), так и включений, часто принимая значения, не присущие природным материалам.

В указанных работах [1,2] предсказано возникновение резонанса диэлектрической проницаемости в подобной ГС, причем положение этого резонанса (в видимой области частот) зависит как от диэлектрической проницаемости исходных смешиваемых материалов, так и от концентрации наночастиц. При этом действительная часть эффективной диэлектрической проницаемости ГС (в приближении эффективной среды Максвелла – Гарнета) может изменяться в широких пределах – от достаточно больших до отрицательных значений. Необычные оптические свойства ГС формируются вследствие плазменного резонанса металлических наночастиц, частота которого зависит от размера и геометрии наночастиц [3,4].

Поскольку для подобных ГС возможно существование области частот, в которой ее эффективная диэлектрическая проницаемость принимает отрицательные значения, вдоль ее границы со средой с положительной диэлектрической постоянной возможно распространение поверхностных электромагнитных волн плазмон – поляритонного типа [3,5].

1. Некоторые оптические свойства гетерогенных сред.

Для указанных сред используется формула Максвелла – Гарнета [2]

$$\frac{\varepsilon_{\text{mix}}(\lambda) - \varepsilon_{\text{m}}(\lambda)}{\varepsilon_{\text{mix}}(\lambda) + 2\varepsilon_{\text{m}}(\lambda)} = \sum_j \eta_j \frac{\varepsilon_{\text{bj}}(\lambda) - \varepsilon_{\text{m}}(\lambda)}{\varepsilon_{\text{bj}}(\lambda) + 2\varepsilon_{\text{m}}(\lambda)}. \quad 2.1$$

Она получена для среды, составленной из шаров, распределенных в материале с диэлектрической проницаемостью  $\varepsilon_{\text{m}}(\lambda)$ ;  $\varepsilon_{\text{bj}}(\lambda) = \varepsilon'_{\text{bj}}(\lambda) + i\varepsilon''_{\text{bj}}(\lambda)$  - диэлектрическая проницаемость материала, из которого изготовлены шары j-го сорта;  $\eta_j$  - относительный объем, занимаемый в смеси шарами j-го сорта;  $\lambda$  - длина волны излучения в вакууме. Рассмотрим смесь, состоящую из наночастиц, радиусы которых лежат в диапазоне нескольких нанометров, одного сорта. Введем обозначение [2]

$$F(\lambda, \eta) = \eta \frac{\varepsilon_{\text{b}}(\lambda) - \varepsilon_{\text{m}}(\lambda)}{\varepsilon_{\text{b}}(\lambda) + 2\varepsilon_{\text{m}}(\lambda)} \quad 2.2$$

Тогда из формулы (2.2) следует, что

$$\varepsilon_{\text{mix}}(\lambda) = \varepsilon_{\text{m}} \frac{1 + 2F(\lambda, \eta)}{1 - F(\lambda, \eta)}. \quad 2.3$$

$\lambda$  - длина волны излучения в вакууме.

Хотя смесь металлических наночастиц с прозрачным материалом может иметь большой показатель преломления, ему будет сопутствовать и большое поглощение. Можно попытаться скомпенсировать мнимую часть диэлектрической проницаемости металла, используя в качестве матрицы лазерную среду, для которой [4]

$$\varepsilon_{\text{m}}(\lambda) = n_{\text{m}}^2 - g^2 - 2in_{\text{m}}g, \quad 2.4$$

где  $n_{\text{m}}$  - показатель преломления лазерной среды;  $g$  - умноженный на  $\lambda/2\pi$  коэффициент усиления. Считается, что коэффициент усиления обнаруживает сравнительно узкий резонанс на длине волны  $\lambda_0$ .

В качестве примера рассмотрим среду, изготовленную из серебряных наночастиц, распределённых в GaAs с показателем преломления, равным 3.6.

Возьмём длину волны равной  $\lambda_0=0.8$  мкм. Кривые на рис.1 [2] имеют выраженный резонансный характер, причем в окрестности резонансных точек  $\varepsilon'_{\text{mix}}(g)$  и  $\varepsilon''_{\text{mix}}(g)$  существенно больше, чем соответствующие величины исходных материалов.

В гетерогенной среде с металлическими наночастицами возникает своеобразный «внутренний резонанс». Этот резонанс является «отголоском» плазменного резонанса, который присущ отдельному металлическому шару. В рассматриваемой нами смеси положение резонансной частоты (длины волны) зависит как от диэлектрической проницаемости исходных материалов, так и параметра  $\eta$ .

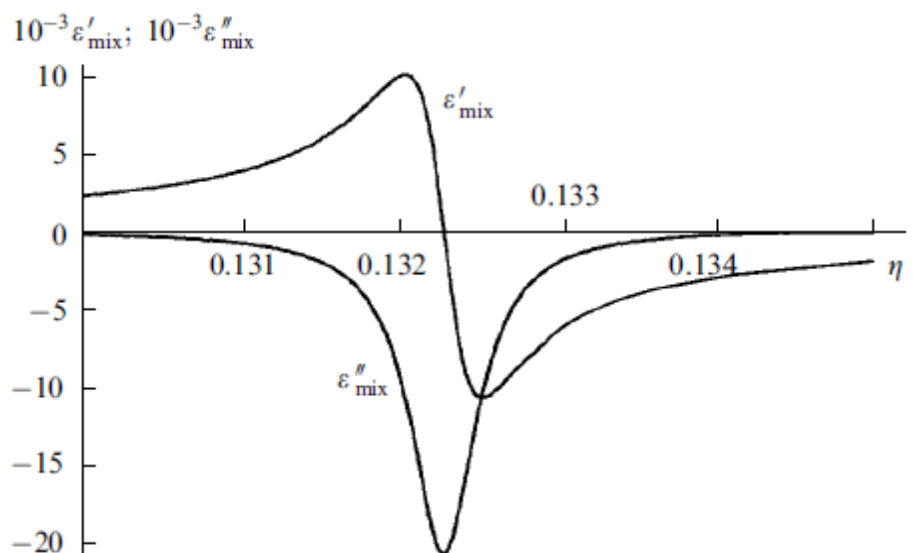


Рис. 1 [2] Функции  $\varepsilon'_{\text{mix}}(g)$  и  $\varepsilon''_{\text{mix}}(g)$  для серебряных наночастиц, взвешенных в активной лазерной матрице, при  $\lambda=0.8$  мкм,  $n_m=3.6$ ,  $\eta=0.132$

Отметим также существенную зависимость действительной и мнимой частей диэлектрической проницаемости от параметра усиления  $g$  активной матрицы (см. рис. 3 [2]).



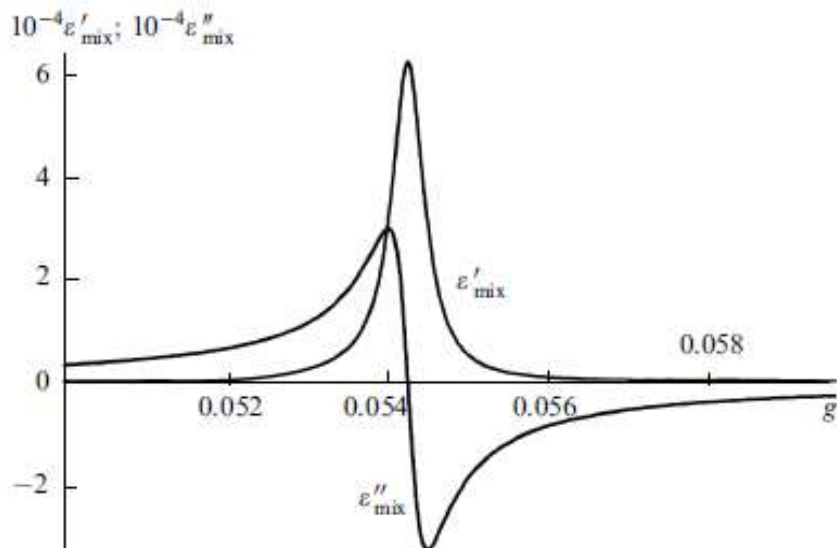


Рис. 2 [2]. Зависимости действительной и мнимой частей диэлектрической проницаемости для серебряных наночастиц, взвешенных в активной лазерной матрице, от параметра усиления  $g$  при длине волны  $0,8 \text{ мкм}$ , коэффициенте преломления  $n_m=3.6$ , факторе заполнения  $\eta=0.054$ .

2. Результаты компьютерного моделирования коэффициента отражения в зависимости от угла падения излучения для структур «стеклянная призма – слой гетерогенной среды – вода» с поверхностными плазмонами (режим возбуждения Кречмана [3,4])

$$\epsilon_1 := 3.770i$$

$$\lambda := 0.8 \cdot 10^{-6}$$

$$\epsilon_2 := -64.614 + i11.65$$

$$\epsilon_3 := 1.33^2 = 1.769$$

$$\theta := 30 \text{ deg}, 30.01 \text{ deg} \dots 90 \text{ deg}$$

$$K1(\epsilon_1, \lambda, \theta) := \frac{2 \cdot \pi}{\lambda} \cdot \left[ \epsilon_1 - \epsilon_1 \cdot (\sin(\theta))^2 \right]^{\frac{1}{2}}$$

$$K2(\epsilon_1, \epsilon_2, \lambda, \theta) := \frac{2 \cdot \pi}{\lambda} \left[ \epsilon_2 - \epsilon_1 \cdot (\sin(\theta))^2 \right]^{\frac{1}{2}}$$

$$K3(\epsilon_1, \epsilon_3, \lambda, \theta) := \frac{2 \cdot \pi}{\lambda} \left[ \epsilon_3 - \epsilon_1 \cdot (\sin(\theta))^2 \right]^{\frac{1}{2}}$$

$$r12(\epsilon_1, \epsilon_2, \lambda, \theta) := \frac{\epsilon_2 \cdot K1(\epsilon_1, \lambda, \theta) - \epsilon_1 \cdot K2(\epsilon_1, \epsilon_2, \lambda, \theta)}{\epsilon_2 \cdot K1(\epsilon_1, \lambda, \theta) + \epsilon_1 \cdot K2(\epsilon_1, \epsilon_2, \lambda, \theta)}$$

$$r23(\epsilon_2, \epsilon_3, \lambda, \theta) := \frac{\epsilon_3 \cdot K2(\epsilon_1, \epsilon_2, \lambda, \theta) - \epsilon_2 \cdot K3(\epsilon_1, \epsilon_3, \lambda, \theta)}{\epsilon_3 \cdot K2(\epsilon_1, \epsilon_2, \lambda, \theta) + \epsilon_2 \cdot K3(\epsilon_1, \epsilon_3, \lambda, \theta)}$$

$$d := 35 \cdot 10^{-9}$$

$$R(\epsilon_1, \epsilon_2, \epsilon_3, \lambda, \theta, d) := \left( \left| \frac{r_{12}(\epsilon_1, \epsilon_2, \lambda, \theta) + r_{23}(\epsilon_2, \epsilon_3, \lambda, \theta) \cdot \exp(i \cdot 2 \cdot K_2(\epsilon_1, \epsilon_2, \lambda, \theta) \cdot d)}{1 + r_{12}(\epsilon_1, \epsilon_2, \lambda, \theta) \cdot r_{23}(\epsilon_2, \epsilon_3, \lambda, \theta) \cdot \exp(i \cdot 2 \cdot K_2(\epsilon_1, \epsilon_2, \lambda, \theta) \cdot d)} \right| \right)^2$$

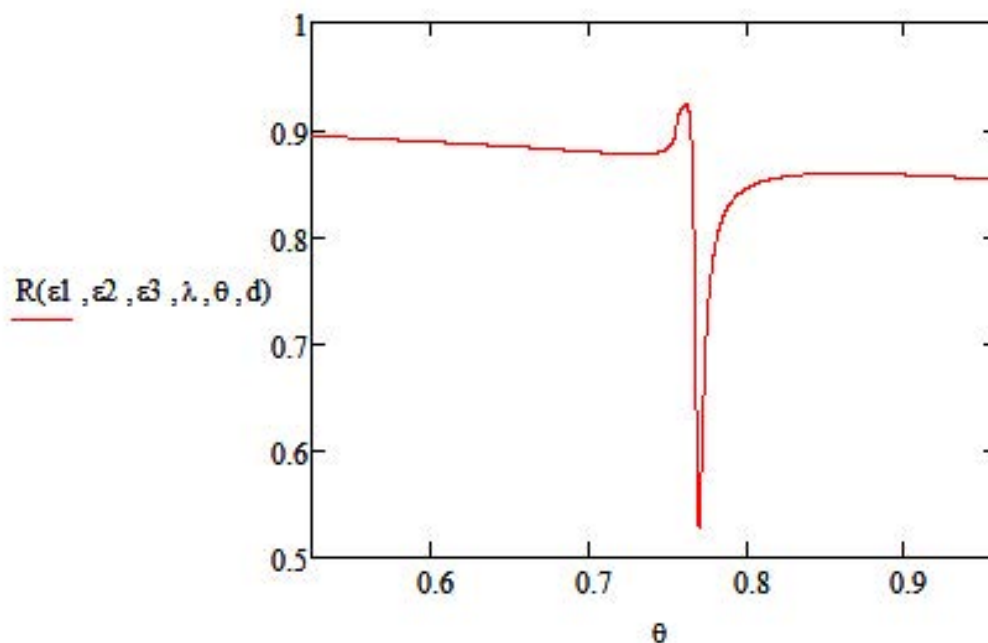


Рис.3. Зависимость коэффициента отражения 3-х-слойной структуры с гетерогенным слоем (GaAs-Ag) от угла падения излучения с длиной волны 0.8.мкм.

Как можно видеть из рис. 3, при указанной длине волны (0.8 мкм) на границе гетерогенной среды (GaAs- Ag) и диэлектрика (воды) структур имеет место возбуждение поверхностных плазмонов, как в случае структур «слой активного металла (Ag, Au и др.) – диэлектрик».

Заключение.

Показано, что при определенных значениях относительного объема, занимаемого металлическими частицами в смеси, длины волны излучения и диэлектрических констант смешиваемых материалов мнимая часть диэлектрической проницаемости гетерогенной среды может быть малой, тогда как действительная (реальная) часть – может быть очень большой (отрицательной). Следовательно, возникают условия для распространения поверхностных плазмонов – поляритонов в слоистой структуре на основе гетерогенной среды с металлическими наночастицами и диэлектрика вдоль границы между средой с отрицательной реальной частью диэлектрической проницаемости и слоем с положительной действительной частью

диэлектрической постоянной. Результаты проведенного компьютерного моделирования зависимости коэффициента отражения света от угла падения излучения в слоистой структуре подтверждают эти выводы.

*Список использованной литературы*

1. Ораевский А.Н., Проценко И.Е. Высокий показатель преломления и другие особенности оптических свойств гетерогенных сред. //Письма в ЖЭТФ. 2000. Том 72. Вып. 9. С. 641 - 646.
2. Ораевский А.Н., Проценко И.Е. Оптические свойства гетерогенных сред. //Квантовая электроника. 2001. Том 31. № 3. С. 252 -256.
3. Климов В.В. Наноплазмоника,- М.: ФИЗМАТЛИТ, 2009.-480 с.
4. Названов В.Ф. Наноплазмоника в наносенсорике и нанофотонике: учебное пособие. – Саратов: изд-во ООО «Новый ветер», 2015. -88 с.
5. Филатов Л.Д., Санников Д.Г., Семенцов Д.И., Евсеев Д. А. Плазмон-поляритонные волны на границе диэлектрика и нанокompозита с металлическими включениями//. ФТТ. 2014. Том 56. Вып. 7. С 1372 – 1378.

***Н.Ш. Гимадеев, В.Ф. Названов***

Саратовский национальный исследовательский государственный университет  
имени Н.Г. Чернышевского

**СПЕКТРЫ СЕЧЕНИЙ ПОГЛОЩЕНИЯ И РАССЕЯНИЯ  
ДВУХСЛОЙНЫХ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ НАНОЧАСТИЦ С ОБОЛОЧКОЙ  
ИЗ УСИЛИВАЮЩЕЙ ГЕТЕРОГЕННОЙ СРЕДЫ МЕТАЛЛ –  
ДИЭЛЕКТРИК**

В представленной статье изложены результаты компьютерного моделирования в квазистатическом (рэлеевском) приближении с использованием пакета программ MathCad оптических характеристик (сечений поглощения и рассеяния) гибридных наночастиц с ядром из гетерогенной среды (с усилением и без) и металлической оболочкой (серебро), а также оптических характеристик (сечений поглощения и рассеяния) наночастиц с металлическим ядром (серебро) и диэлектрической оболочкой.

**Ключевые слова:** двухслойные (гибридные) металлические наночастицы «ядро – оболочка», локализованные плазмоны, спектры поглощения и рассеяния наночастиц, гетерогенные среды металл-диэлектрик.

**Актуальность темы.** В настоящее время большое внимание уделяется гибридным (двухслойным) наночастицам с использованием благородных металлов и диэлектриков. Уникальные оптические свойства наночастиц благородных металлов, обусловленные локализованным плазмонным резонансом, в настоящее время широко используются в различных технических

приложениях: оптические переключатели, модуляторы излучения, оптическая микроскопия, создание маркеров для электронной микроскопии, твердофазный иммуноанализ, биосенсоры, генные чипы, создание светоизлучающих устройств и лазеров, таких как спазер (SPASER) [1,2].

Представляет значительный интерес использование в качестве диэлектриков в двухслойных наночастицах (как в качестве ядра, так и оболочки) так называемых металлодиэлектрических гетерогенных сред, особенностью которых является не только возможность достижения определенных показателей преломления, но и возможность эффектов оптического усиления [1,3-4].

Все вышесказанное определяет актуальность представленной работы.

Основной целью работы являлось выяснение особенностей оптических характеристик (спектров сечений поглощения и рассеяния излучения) двухслойных наночастиц, состоящих из диэлектрического ядра с усилением и металлической оболочки, так и частиц, состоящих из металлического ядра и диэлектрической оболочки с усилением.

**Результаты компьютерного моделирования оптических свойств (спектров сечений поглощения и рассеяния излучения) гибридных наночастиц (Ag) в квазистатическом приближении.**

**1. Оптические свойства гибридных наночастиц с ядром из гетерогенной среды, покрытой слоем металла (серебро).**

Для компьютерного моделирования использовались следующие параметры:

Таблица 1. Константы для серебряных частиц .

Металл	$\epsilon$	$\omega_p$ (эВ)	$\gamma$ (эВ)
серебро	5	9.5	0.0987

$\omega_p$ -частота объемных плазмонных колебаний свободных электронов;

$\gamma$ - константа затухания.

Таблица 2. Параметры для гетерогенной среды металл –диэлектрик.

$\eta$	g	rc; rs( нм)
0.13	0.07	7,5;8
0.15	0.02	8; 9.7
0.16	0.06	9;10
0.13	0	7.5;8

Основные формулы для описания оптических свойств данных структур:

$$\epsilon_s(\lambda) := \epsilon_0 - \frac{\omega_p^2}{\omega(\lambda) \cdot (\omega(\lambda) + i \cdot \gamma_1)} \quad \text{диэлектрическая функция металла}$$

$$P(rc, rs) := 1 - \left(\frac{rc}{rs}\right)^3 \quad \text{отношение объема ядра к ее полному объему}$$

$$\epsilon_m(\lambda) := nm^2 - g^2 - 2 \cdot i \cdot nm \cdot g \quad \text{диэлектрическая функция для усиливающей среды}$$

$$\delta(\lambda, \eta, rc, rs) := \frac{\epsilon_s(\lambda) \cdot \epsilon_a(\lambda) - \epsilon_h \cdot \epsilon_b(\lambda)}{\epsilon_s(\lambda) \cdot \epsilon_a(\lambda) + 2 \cdot \epsilon_h \cdot \epsilon_b(\lambda)} \quad \text{поляризуемость наночастицы}$$

$$\epsilon_c(\lambda, \eta) := \epsilon_m(\lambda) \cdot \frac{1 + 2 \cdot F(\lambda, \eta)}{1 - F(\lambda, \eta)} \quad F(\lambda, \eta) := \eta \cdot \frac{\epsilon_s(\lambda) - \epsilon_m(\lambda)}{\epsilon_s(\lambda) + 2 \cdot \epsilon_m(\lambda)}$$

$$\epsilon_a(\lambda, \eta, rc, rs) := \epsilon_c(\lambda, \eta) \cdot (3 - 2 \cdot P(rc, rs)) + 2 \cdot \epsilon_s(\lambda) \cdot P(rc, rs)$$

$$\epsilon_b(\lambda, \eta, rc, rs) := \epsilon_c(\lambda, \eta) + \epsilon_s(\lambda) \cdot (3 - P(rc, rs))$$

$$\sigma_{abs}(\lambda, \eta, rc, rs) := \frac{8 \cdot \pi^2 \cdot \sqrt{\epsilon_h}}{\lambda} \cdot rs^3 \cdot \text{Im}(\delta(\lambda, \eta, rc, rs)) \quad \text{сечение поглощения}$$

$$\sigma_{sc}(\lambda, \eta, rc, rs) := \frac{128 \cdot \pi^5 \cdot \epsilon_h^2 \cdot rs^6}{3 \cdot \lambda^4} \cdot (|\delta(\lambda, \eta, rc, rs)|)^2 \quad \text{сечение рассеяния}$$

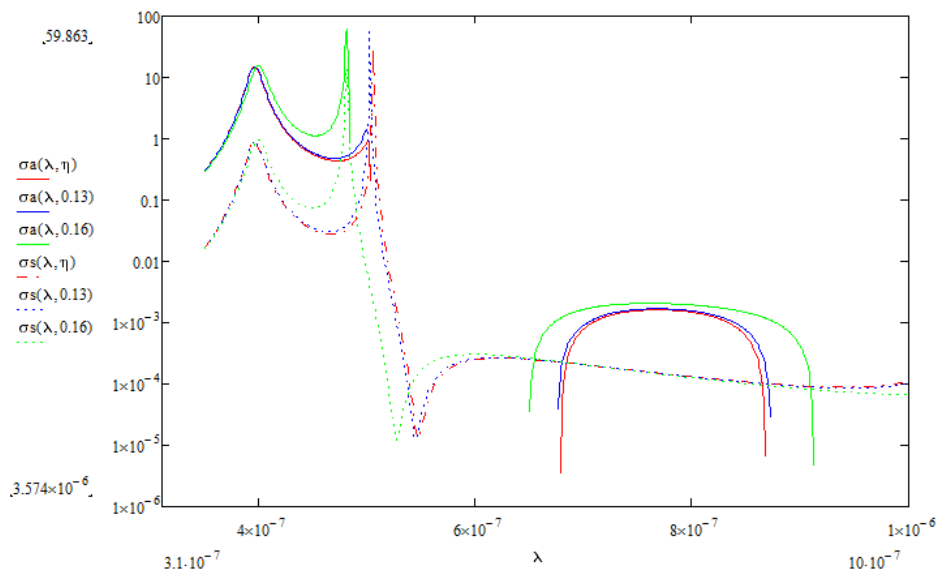


Рисунок 1. Зависимость спектра поглощения наночастицы диэлектрического ядра, покрытого слоем серебра, для разных коэффициентов заполнения  $\eta$

Как видно на рис. 1, изменение фактора заполнения  $\eta$  оказывает значительное влияние на смещение спектров относительно длины волны, а также изменение величины пиков поглощения и рассеяния.

При компьютерном моделировании найдено значение фактора заполнения  $\eta$ , при котором достигнуто увеличение сечения рассеяния при

затухании поглощения (см. рис.2).

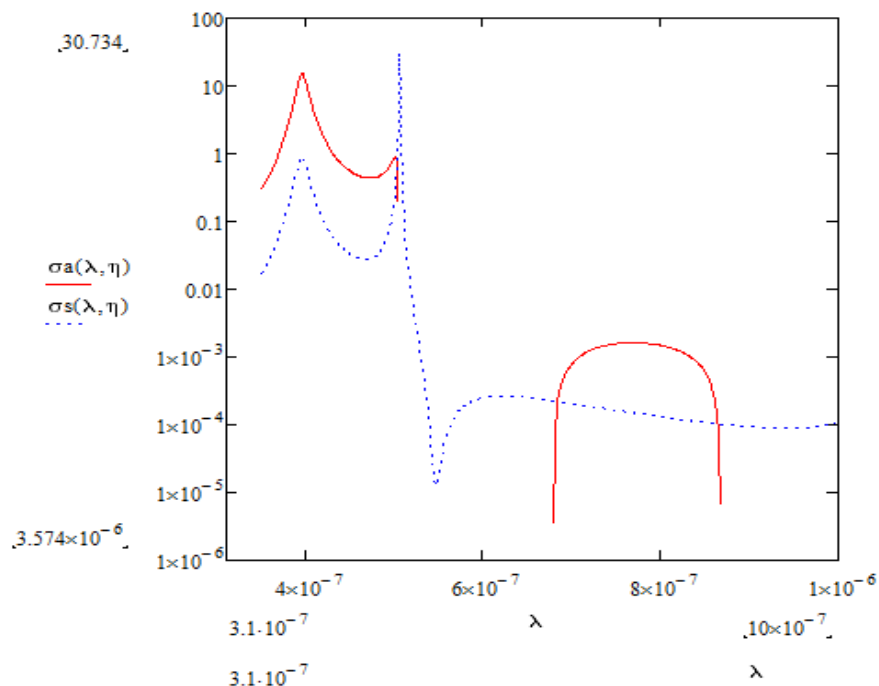


Рисунок 2. Результат оптимизации по коэффициенту заполнения  $\eta$  для получения максимума спектра рассеяния при минимуме спектра поглощения

Как видно из зависимостей спектров поглощения и рассеяния от длины волны (рис. 3), изменение коэффициента усиления в активной гетерогенной среде оказывает существенное влияние на величины пика, связанного с взаимодействием локализованных плазмонов ядра с материалами оболочки и пиков, обусловленных поглощением в матрице. При введении коэффициента усиления  $g$  для активной матрицы происходит компенсация потерь в металлической оболочке, при этом происходит снижение поглощения при увеличении сечения рассеяния.

На рис. 4 представлены результаты моделирования сечений поглощения и рассеяния наночастиц «диэлектрическое ядро – Ag- оболочка» при оптимизации коэффициента усиления  $g$  для достижения максимума сечений рассеяния при минимуме сечений поглощения.

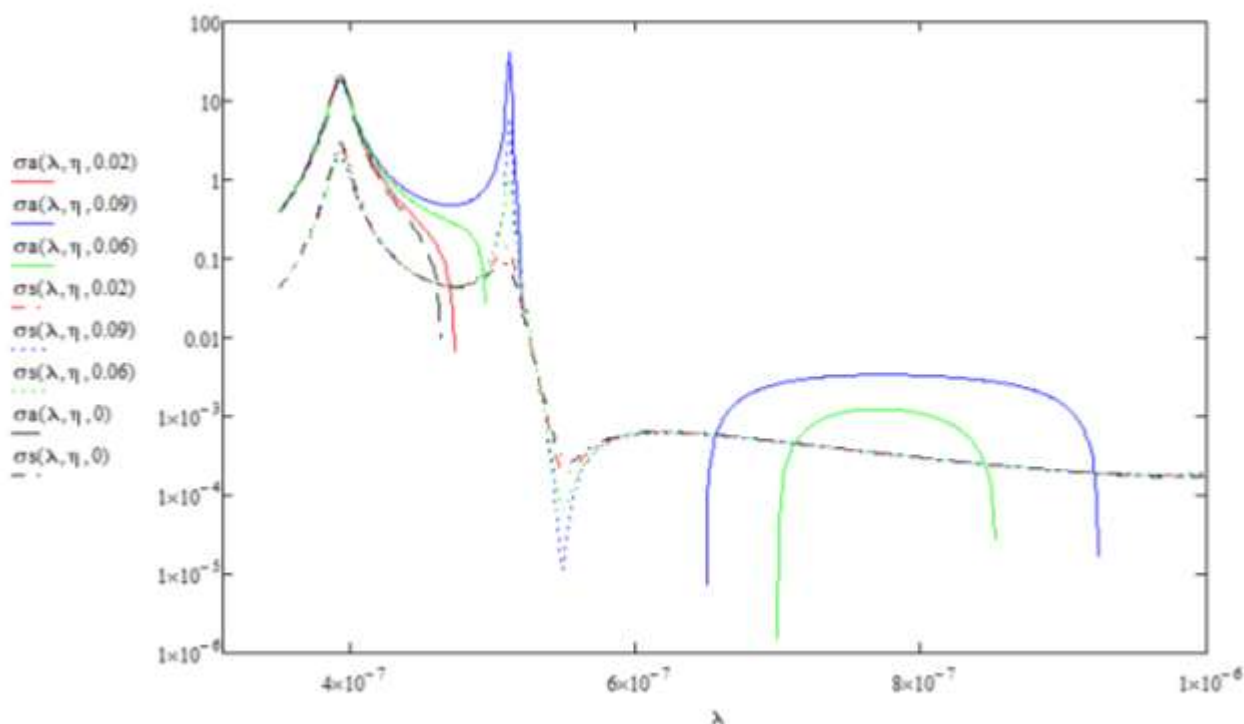


Рис. 3. Зависимости спектров сечения поглощения наночастицы из диэлектрического ядра, покрытого слоем серебра, для разных коэффициентов усиления диэлектрика.

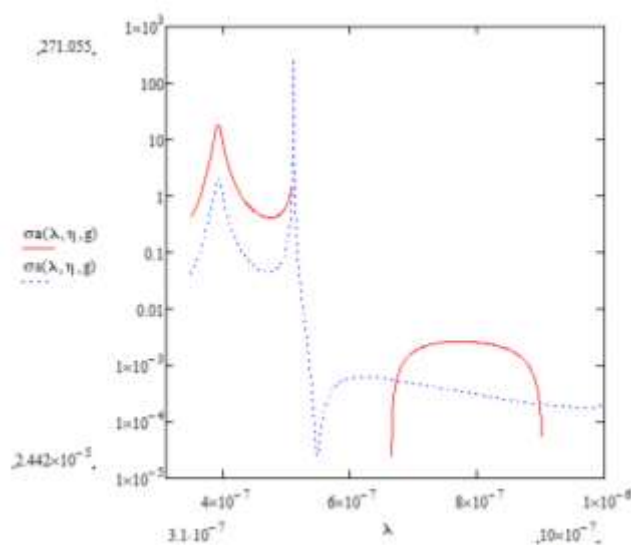


Рис. 4. Результат оптимизации по коэффициенту усиления для получения максимума сечений рассеяния излучения при минимуме сечений поглощения

## 2. Оптические свойства гибридных наночастиц с серебряным ядром, покрытым оболочкой из активной гетерогенной среды

В работе было выполнено компьютерное моделирование сечений поглощения и рассеяния наночастиц с металлическим ядром (серебро), покрытым оболочкой из активной гетерогенной среды. Достигнуты минимальные значения спектров поглощения и рассеяния (рис. 5),

обусловленные снижением величины поляризуемости наночастицы.

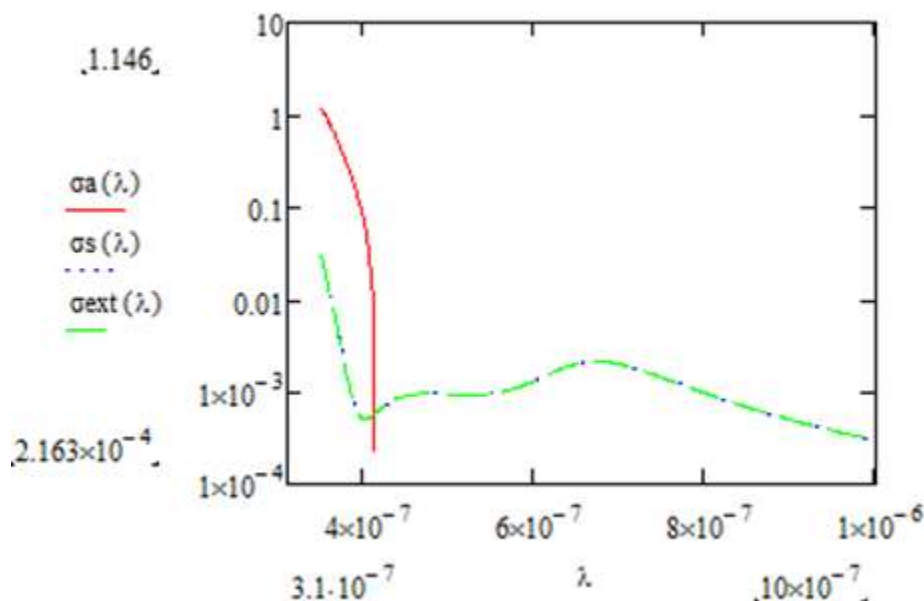


Рис. 5. Результат оптимизации спектров наночастиц с серебряным ядром, покрытых слоем активного диэлектрика

### Основные результаты работы:

1. Выполнено компьютерное моделирование спектров сечений поглощения и рассеяния двухслойной наночастицы с ядром из гетерогенной среды, покрытой серебряной оболочкой. Результаты моделирования демонстрируют изменение указанных спектров сечений при различных радиусах ядра и оболочки, факторах заполнения и коэффициентах усиления. Как видно из результатов, возможно управлять сечениями поглощения и рассеяния при помощи варьирования данных параметров.

В указанных структурах возможно управлять сечением поглощения с помощью использования в ядре активных гетерогенных сред.

Показано, что при подборе указанных параметров, в частности, коэффициента усиления активной гетерогенной среды, можно достичь больших сечений рассеяния излучения и значительное уменьшение сечения поглощения. Этот результат может быть интересен для разработок светоизлучающих устройств на основе подобных наночастиц.

Выполнено моделирование спектральных зависимостей сечений поглощения и сечений рассеяния наночастиц, состоящих из металлического (серебро) ядра, покрытого слоем гетерогенной среды с усилением. Показано,



что выбором параметров: факторов заполнения, радиусов ядер и оболочек и в особенности коэффициента усиления активной среды можно управлять сечениями поглощения и рассеяния гибридных наночастиц (минимизацией величины поляризуемости  $\delta$ ).

Основным результатом является достижение весьма малых значений сечений рассеяния и поглощения при использовании гетерогенной среды с усилением. Полученный результат представляет значительный интерес в связи с проблемой создания так называемых «покрытий-невидимок» («плащей – невидимок»).

Список использованной литературы:

1. Климов В.В. Наноплазмоника. - М.: ФИЗМАТЛИТ, 2009. 480 с.
2. Названов В.Ф. Наноплазмоника в наносенсорике и нанофотонике: учебное пособие. – Саратов: Изд-во ООО «Новый ветер», 2015.-88с.
3. Ораевский А.Н., Проценко И.Е. Высокий показатель преломления и другие особенности оптических свойств гетерогенных сред.// Письма в ЖЭТФ. 2000. Том 72. Вып. 9. С. 641 – 646.
4. Ораевский А.Н., Проценко И.Е. Оптические свойства гетерогенных сред.// Квантовая электроника. 2001. Том 31. № 3. С. 252 -256.
5. Названов В.Ф., Коваленко Д.И. О поведении амплитуды и фазы отраженного излучения в многослойных структурах с поверхностными плазмонами // Письма в Журнал технической физики. 1995. Т. 21. № 14. С. 60-63.

***В.Ф. Кабанов, Е.Г. Глуховской, М.И. Шишкин***

Саратовский национальный исследовательский государственный университет  
имени Н.Г. Чернышевского

## **ЭЛЕКТРОННЫЕ ПРОЦЕССЫ В НАНОЧАСТИЦАХ СУЛЬФИДА СВИНЦА В МУЛЬТИЗЁРЕННОЙ СТРУКТУРЕ**

В работе исследованы структурные и электрофизические свойства наночастиц сульфида свинца (PbS), полученные химическим способом и осаждённые электрофоретически на проводящую подложку. Методами сканирующей электронной и туннельной микроскопии определены морфология слоя, форма и размеры наночастиц. Из анализа туннельно-токовых вольтамперных характеристик (ВАХ) отдельных наночастиц установлено наличие низкополевой эмиссии и механизма токопереноса, аналогичного механизму тока, ограниченного пространственным зарядом (ТОПЗ). Оценены параметры

наночастиц в мультимасштабной структуре.

**Ключевые слова:** низкополевая эмиссия, наночастицы, квантово-размерные эффекты

Квантово-размерные частицы являются одними из наиболее интересных квантово-размерных структур с точки зрения применения в нанoeлектронных и оптоэлектронных приборах. Перспективными материалами при этом представляются некоторые из полупроводниковых соединений  $A_3B_5$  и  $A_4B_6$ , в которых проявляются особенности свойств, обусловленных экстремально малыми значениями эффективной массы электронов проводимости, что обеспечивает наибольшие значения длины волны де Бройля для электронов проводимости, исчисляемые десятками нанометров.

Размерное квантование происходит, когда характерные размеры частицы становятся сравнимы с длиной волны де Бройля для электрона  $\lambda = h/p = h/(2mE)^{1/2}$ . Для большинства полупроводников  $\lambda \sim 1$  нм. Создание и использование частиц с размерами порядка одного нанометра сопряжено с большими химико-технологическими трудностями.

При концентрациях электронов, больших  $(\lambda)^{-3}$ , благодаря перекрытию их волновых функций, кулоновскому взаимодействию и самолокализации в сравнительно больших частицах возможны явления, свойственные квантовым точкам (КТ) – кулоновская блокада, низкополевая эмиссия, ограничение тока пространственным зарядом [1,2].

По условиям технологического синтеза наночастиц предпочтение среди указанных полупроводников может быть отдано соединениям  $A_4B_6$ , по которым, в отличие от полупроводников  $A_3B_5$ , имеются обширные литературные данные по синтезу и свойствам наночастиц [3]. При этом, однако, усилия исследователей направлены на создание наночастиц с размерами менее 10 нм, с чем связаны проблемы синтеза и стабильности их свойств.

В работе исследованы слои нанопорошка сульфида свинца, полученного химической реакцией гидроксида натрия и нитрата свинца с осаждением сероводородом, марки «химически чистый, для полупроводников».

Нанопорошок после ультразвуковой обработки в суспензии изопропилового спирта наносился электрофоретически на проводящие подложки в виде слоя мультизёрной структуры.

Фазовый и структурный состав исследовались по методикам рентгеновского фазового анализа на дифрактометре ДРОН-4 с использованием рентгеновской трубки с медным анодом ( $\text{Cu-K}_\alpha$ ). Для анализа дифрактограмм использовалась база данных PCPDFWIN Международного Центра по дифракционным данным (JCPDS, v. 2.02, 1999). Идентифицирован состав порошка как фаза чистого PbS с кубической гранцентрированной решеткой.

Форма и размеры наночастиц контролировались методом сканирующей электронной микроскопии (СЭМ) и сканирующей туннельной микроскопии (СТМ). Зёрна представляли собой гранённые уплощённые кристаллиты с размерами 40–70 nm.

Измерения методом СТМ проводились на микроскопе Nanoeducator-2-NT-MDT, позволяющем получать изображения рельефа с атомарным разрешением. Величины зазора между зондом и образцом измерялись по ток-высотным характеристикам и варьировались от 0 до 10 nm. Топографирование рельефа поверхности образцов проводились в режиме сканирующей атомно-силовой и туннельной микроскопии, в том числе с целью контроля чистоты и микродефектов, а также для выбора на поверхности образцов подходящих для исследований участков.

Измерения СТМ-ВАХ проводились в пределах величин тока - от  $10^{-11}$  до  $10^{-7}$  А, напряжения – от 0 до 8 V. В автоматическом режиме измерялись не менее 10 ВАХ на точку, в нескольких точках на поверхности образца. По воспроизводимости результатов измерений отбирались точки устойчивой характеристики, после чего проводились усреднения ВАХ. Результаты измерений обрабатывались по общепринятым методикам сканирующей зондовой микроскопии полупроводниковых наноструктур.

Для интерпретации отдельных экспериментальных результатов ВАХ использовались представления об автоэмиссии из полупроводников с участием

уровней локализованных электронных состояний по теории Моргулиса–Стрэттона [4]:

$$j_s = q n_0 \left( \frac{kT}{2\pi m_0} \right)^{1/2} \cdot e^{-\frac{8\pi\sqrt{2m_0} A_s^3}{3hqE} \cdot \theta} \quad (1)$$

где:  $j_s$  – плотность тока эмиссии,  $E$  – локальная напряженность электрического поля,  $n_0$  – концентрация электронов проводимости в области границы зерна,  $m_0$  – масса электрона,  $A_s$  – работа выхода электронов из полупроводника,  $q$  – модуль величины заряда электрона,  $h$  – постоянная Планка,  $\theta$  – значения функции Нордгейма. В рамках одномерной модели  $E \sim V/d$ , где  $V$  – напряжение на зазоре,  $d$  – значения величин зазора. При анализе использовались литературные данные о значениях работы выхода ( $\sim 4.5$  eV) для PbS [5].

На рис. 1 представлены типичные ВАХ эмиссии (минус потенциала на полупроводнике) в области сильных полей ( $V > 6$  V,  $E > 10^7$  V/cm), которые имеют хорошую линейную аппроксимацию в координатах  $\ln I - 1/V$ . По этим результатам с использованием выражения (1) были проведены оценки величин  $\theta$  и  $n_0$ . Значение функции Нордгейма  $\theta$  находилось в диапазоне (0,13 - 0,15), концентрация электронов в области границы  $\sim (5 - 8) \cdot 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ . При этом учитывалось, что эмиссия происходит из наноострия с размером его вершины порядка 5 nm.

Полученные низкие значения величин поправочной функции Нордгейма (для типичных металлов  $\sim (0,7 - 0,9)$ ) могут указывать на существенное влияние сил изображения (эффекта Шоттки), действующих фактически на снижение работы выхода. Этот факт позволяет говорить об относительно малых величинах показателя в экспоненте формулы (1) или, иначе говоря, о проявлении низкополевой эмиссии, свойственной квантовым точкам.

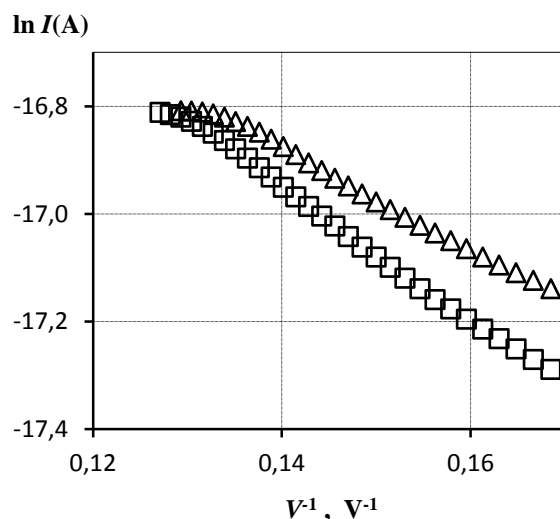


Рис. 1. Типичные ВАХ наночастиц PbS в области сильных значений напряженности электрического поля

Для большинства образцов ВАХ в интервале величин напряжения (3-6) В с высоким уровнем достоверности аппроксимации (более 0,99) линеаризуется в координатах  $(I - V^2)$  (рис. 2), что является характерным для механизма тока, ограниченного пространственным зарядом (ТОПЗ), проявляющегося в возникновении в полупроводнике локализованного объемного заряда, ограничивающего ток.

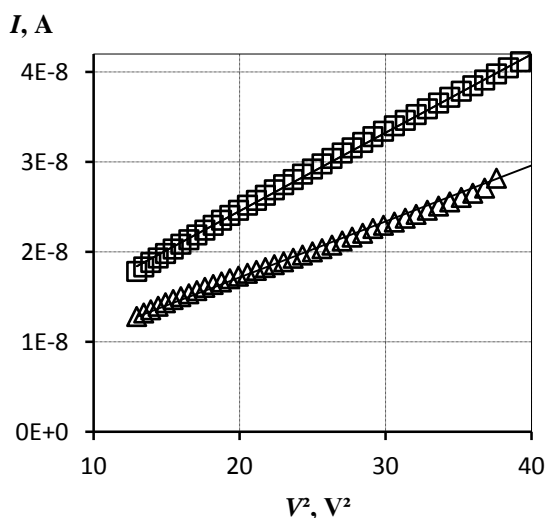


Рис.2. Типичные ВАХ наночастиц PbS в области средних значений напряженности электрического поля

В нашем случае оценка длины волны де Бройля для электрона PbS даёт величину  $\lambda$  порядка 10 nm. Это позволяет предположить, что при концентрациях электронов, больших  $(\lambda)^{-3} \sim 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ , необходимо учитывать

перекрытие их волновых функций и, соответственно, кулоновское взаимодействие, следствием чего будет образование самолокализованного заряда, оказывающего блокирующее влияние на прохождение тока. ВАХ в указанном интервале, таким образом, лимитируется ограничением тока в наночастице. При этом концентрация электронов проводимости в наночастице должна быть выше  $10^{18} \text{ см}^{-3}$ , что и подтверждается полученными и приведёнными выше данными.

Таким образом, в работе исследованы структурные и электрофизические свойства наночастиц (40-70 nm) PbS, полученных химическим способом и осаждённых электрофоретически на проводящую подложку. По 3D-топограммам определена тонкая структура поверхности в виде множества ( $\sim 400 \mu\text{m}^{-2}$ ) пирамидальных гранённых острий с размерами до 10 nm. Из анализа туннельных ВАХ отдельных наночастиц установлено наличие низкополевой эмиссии и механизма токопереноса, аналогичного механизму ТОПЗ. Определены значения функции Нордгейма и величина концентрации свободных носителей заряда. Полученные результаты интерпретированы с учётом квантово-размерной природы рассматриваемых процессов.

Авторы благодарны Рокаху А.Г. и Жукову Н.Д. за обсуждения и полезные советы.

*Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научных проектов 16-07-00093 и 16-07-00226.*

#### *Список использованной литературы*

1. Жуков Н.Д., Глуховской Е.Г., Мосияш Д.С. Локальная эмиссионная спектроскопия микрозерен поверхности полупроводников  $\text{A}^{\text{III}}\text{B}^{\text{V}}$  // ФТП. 2016. Т.50. №7. С.911-917.
2. Михайлов А.И., Кабанов В.Ф., Жуков Н.Д. Особенности автоэлектронной эмиссии из субмикронных выступов шероховатой поверхности антимонида индия // Письма в ЖТФ. 2015. Т.41. №12. С.8-14.
3. Лукашин А.В., Елисеев А.А. Синтез полупроводниковых наночастиц сульфида свинца и сульфида кадмия. М., 2011. 38с.
4. Егоров Н.В., Шешин Е.П. Электронная эмиссия. М., 2011. 704с.
5. Ибрагимов Х.И., Корольков В.А. Работа выхода электрона в физико-химических исследованиях. М., 2002. 526с.

## **МОДЕЛИРОВАНИЕ ДИНАМИКИ ПРОЦЕССОВ В МНОГОСЛОЙНЫХ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ СТРУКТУРАХ ПРИ ВНЕШНИХ ВОЗДЕЙСТВИЯХ**

Математическое моделирование электронных процессов в полупроводниковых структурах широко применяется при проектировании различных полупроводниковых приборов, а так же при интерпретации экспериментально полученных данных. Построение адекватных математических моделей, позволяющих учитывать взаимное влияние всех компонентов многослойных систем друг на друга, а также различных внешних воздействий (оптическое излучение, электрические и магнитные поля, и др.), является актуальной задачей полупроводниковой электроники.

Математические расчеты с применением систем высокого уровня (MathCAD, MatLAB, TCAD, Comsol Multiphysics, QuantumWise Atomistix ToolKit и др.) не требуют знаний системного программирования. Эти системы позволяют в формализованном виде строить математические модели физических, химических процессов и явлений в любых материалах и средах[1,2]. Существует множество программных пакетов, позволяющих осуществлять расчет параметров и характеристик различных полупроводниковых приборов и интегральных схем. Все они основаны на встроенных математических моделях физических явлений и процессов, а именно систем уравнений, и методах численного моделирования, которые пользователь выбирает исходя из необходимой ему задачи. Но подбор из многочисленного списка вариантов не всегда дает адекватный результат, сопоставимый с литературными или экспериментальными данными. В таком случае становится необходим творческий подход и минимальные знания азов программирования.

В данной работе описывается методика настройки и адаптации математической модели с использованием среды быстрой разработки и

программирования Delphy 7 на примере планарной многослойной арсенид-галлиевой структуры  $n^+ - n - n^+$  с неидеальными омическими контактами. Данная среда в качестве языка программирования использует строго типизированный объектно-ориентированный язык, в основе которого лежит хорошо знакомый Object Pascal. Она выбрана как наиболее известная и имеющая большое количество доступной методической литературы (см. например [3]). Главными ее особенностями являются широкая функциональность и возможность производить моделирование динамики каких-либо процессов в исследуемых многослойных структурах, т.е. их визуализацию во времени.

Для описания динамики пространственного заряда и тока в полупроводниковых структурах, используется локально-полевая математическая модель (см. например [4,5]), включающая уравнение непрерывности и уравнение Пуассона с соответствующими граничными и начальными условиями, и являющаяся нелинейной системой уравнений с частными производными. Особенность использования данной модели с соответствующей системой уравнений и метода конечных разностей [6] для решения данной системы в сочетании со средой программирования Delphy 7 позволяет визуализировать с помощью встроенного графического модуля процесс изменения распределений  $n(x)$ ,  $E(x)$  и  $\varphi(x)$  во времени, учитывать влияние внешних воздействий (например, оптического), выводя на экран всю необходимую информацию в виде чисел, графиков и индикаторов, а также изменять входные параметры модели ( $\varphi_k$ ,  $N_d$ ,  $\tau$ ,  $h$ ,  $U_{см}$ ) и выполнять различные команды из главного окна созданной программы. Таким образом упрощается настройка и отладка модели, а ее адекватность устанавливается в результате численного и визуального (графического) сопоставления выходных параметров с известными физическими представлениями [7,8] или экспериментальными данными.

На рис. 1 показаны рассчитанные распределения концентрации, электрического поля и потенциала в многослойной  $Me - n^+ - n - n^+ - Me$



структуре при различных условиях: в начальный момент времени, после установления решения, при приложении внешнего электрического поля и при воздействии локальной засветки центральной области структуры.

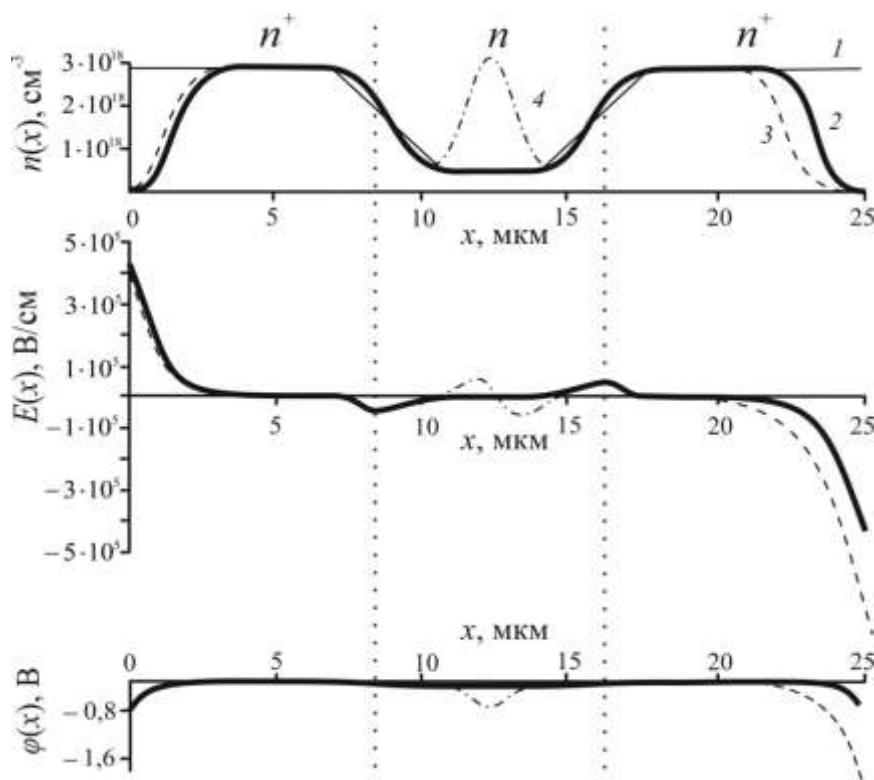


Рис. 1. Стационарные распределения концентрации электронов  $n(x)$ , электрического поля  $E(x)$  и потенциала  $\varphi(x)$  для структуры  $Me - n^+ - n - n^+ - Me$  GaAs при различных условиях:  
 1 – в начальный момент времени,  
 2 – после установления ТД равновесия (установления решения),  
 3 – при приложении внешнего электрического поля ( $U_{см} = 1$  В),  
 4 – при воздействии локальной засветки центральной области структуры

Внешнее воздействие на структуру моделировалось как изменение соответствующих начальных и/или граничных условий модели. Сходимость решения достигалась выбором соотношения между шагом по времени  $\tau$  и по координате  $h$ , а адекватность модели оценивалась по соответствию полученных распределений известным физическим представлениям.

#### Список использованной литературы

1. Терин Д.В., Кондратьева О.Ю., Ревзина Е.М., Вениг С.Б. Оценка надежности нанобиосистем на основе теории копул. Методы компьютерной диагностики в биологии и медицине: материалы Всерос. Школы-семинара/ под ред. проф. Д.А.Усанова. – Саратов: изд-во Саратовский источник, 2015. – С. 182–184. ISBN978-5-91879-541
2. Михайлов А.И., Митин А.В., Кожевников И.О. Оптимизация алгоритма математической модели установления распределения заряда и электрического поля в

многослойной полупроводниковой структуре с металлическими контактами // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Физико-математические науки, 2013. – № 4 (28). – С. 133–146.

3. Галушка И.В., Терин Д.В., Жаркова Э.А., Karpenko-Jereb L.V., Кондратьева О.Ю. Оценка отклика полученных электрохимически структур пористого кремния на внешнее электромагнитное воздействие // В сборнике: Актуальные проблемы теории и практики электрохимических процессов сборник материалов III Международной научной конференции молодых ученых. 2017. С. 79-83.

4. Кондратьева О.Ю., Терин Д.В., Ревзина Е.М. Информационные технологии: исследовательские расчеты в среде mathcad. Введение // Учебно-методическое пособие / Mauritius, 2018.

5. Кондратьева Е.В., Кондратьева О.Ю. Экономический анализ эффективности прогнозирования успеваемости на основе FUZZY LOGIC // В сборнике: Экономическая наука в Саратовском университете: прошлое и современность Материалы Международной конференции в рамках Международного научного симпозиума, посвященного 100-летию гуманитарного образования в СГУ "Столетие гуманитарного образования в Саратовском государственном университете: диалог времен - прошедшего, настоящего и будущего". Под редакцией О.Ю. Челноковой. 2017. С. 30-32.

*А.С. Колесникова, О.Ю. Кондратьева, Д.В. Терин*

Саратовский национальный исследовательский государственный университет  
имени Н.Г. Чернышевского

## **МОДЕЛИРОВАНИЕ КОМПОЗИЦИОННЫХ ПОКРЫТИЙ ДЛЯ ДАТЧИКОВ ДАВЛЕНИЯ**

В представленной статье в качестве способа управления изменением проводимости композитного материала, входящего в состав датчиков давления, предлагается использовать процессы допирования композита и сжатия.

**Ключевые слова:** датчик давления, полистирол, вольфрам, проводимость

Последние десятилетия в различных области науки и техники активно используются датчики давления в качестве систем тактильного осязания или биомехатронного очувствления, систем контроля формы предметов в стоматологии, ортопедии, хирургии. Важной составной частью всех датчиков являются композитный материал на основе диэлектрической матрицы. Основным отличием во всех датчиков заключается в качества измерительной аппаратуры, зависящей от проводимости композитного материала, входящего в их состав. Расширить области применения датчиков возможно путем решения проблемы управления изменением проводимости композитных материалов на основе диэлектрической матрицы с проводящими включениями при их

деформации. В связи с этим цель данной работы является поиск способа для управления изменением проводимости композитных материалов на основе диэлектрической матрицы с проводящими включениями при их деформации с использованием численного моделирования.

Композиционным материалом является полистирол. Установлено, что при увеличении концентрации атомов вольфрама в полистироле запрещенная зона сужается, а также еще большее уменьшение запрещенной зоны допированного композиционного материала наблюдается при его сжатии.

Введение примесей различной природы, включая ионы вольфрама (рис.1), приводит к появлению стабильных полос поглощения, простирающихся вплоть до ИК-области поглощения (до 800–900 нм в зависимости от способов введения). При этом наблюдается появление фотоактивности допированных образцов в видимой области спектра с красной границей около 600–700 нм. Введение примесей приводит к «сужению» запрещенной зоны за счет появления состояний вблизи краев зоны проводимости или валентной зоны.

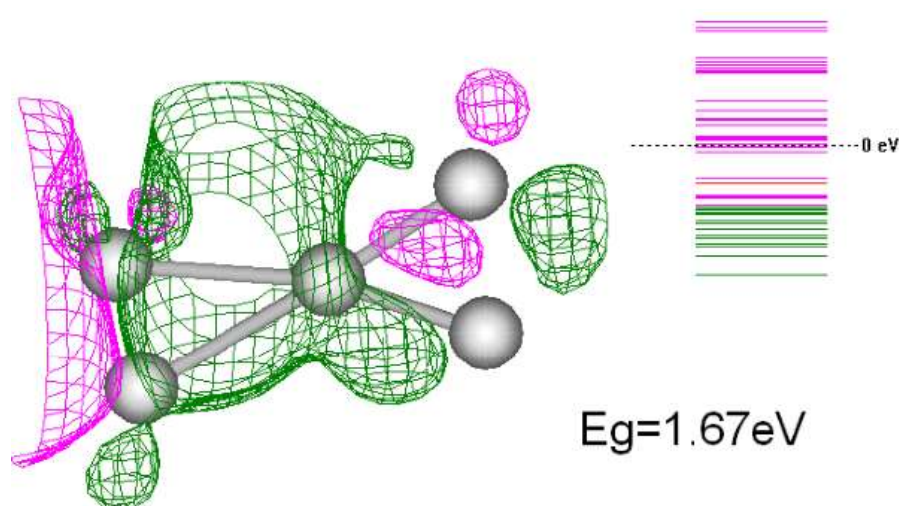


Рисунок 1. Кластер вольфрама со своим энергетическим слоем

В качестве композиционного материала используется полистирол с допированными атомами вольфрама (рис.2). Поиск равновесного состояния композита осуществлялся с использованием энергетического потенциала AMBER, численные исследования проводимости чистой и допированной вольфрамом молекулы полистирола осуществлялось методом функционала

плотности с энергетическим потенциалом РМ6. Исследования осуществлялись при температуре 300К. Температурный режим моделировался при использовании термостата Берендсена.

Исследование проводящих свойств чистого и допированного вольфрамом полистирола осуществляется на основе энергетического спектра при оценке изменения величины запрещенной зоны. В процессе численного эксперимента установлено, что запрещенная зона чистого полистирола составляет 6.902 эВ. Известно, что полистирол и вольфрам обладают разным типом проводимости. Следовательно, при допировании полистирола атомами вольфрама можно управлять или изменять тип проводимости полистирола. В связи с этим проводилось исследование допирования полистирола атомами вольфрама, изменяя количество атомов вольфрама в полистироле.

При увеличении концентрации атомов вольфрама в полистироле наименьшее значение величины запрещенной зоны удалось достичь равное 5.8эВ. Для улучшения проводимости допированного атомами вольфрама полистирола, у которого значение зоны проводимости достигалось 5.8эВ, проводилось его сжатие. Для осуществления процесса сжатия допированного полистирола осуществлялось его расположение между двумя жестко закрепленными графеновыми пластинами (рис.3). Исследование изменения проводимости полистирола осуществлялось при резком сближении пластин. При этом движение осуществлялось только одной пластины, которая располагается слева от полистирола. На рисунке 4 представлен шаг сдвига графеновой пластины и электронные свойства допированного полистирола.

При сравнении значений энергетической щели (5.8 эВ) у допированного атомами вольфрама в полистироле со значением энергетической щели (5.16 эВ) при его сжатии наблюдается уменьшение энергетической щели на 0.64 эВ. Следовательно, можно заключить, что процесс допирования композита и процесс сжатия можно использовать в качестве способа управления изменением проводимости композитного материала, входящего в состав датчиков давления.

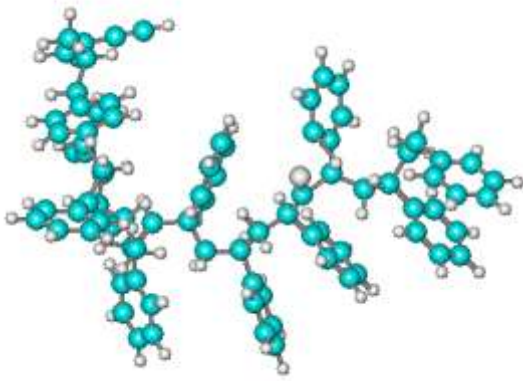


Рис.2. Композиционный материал полистирола

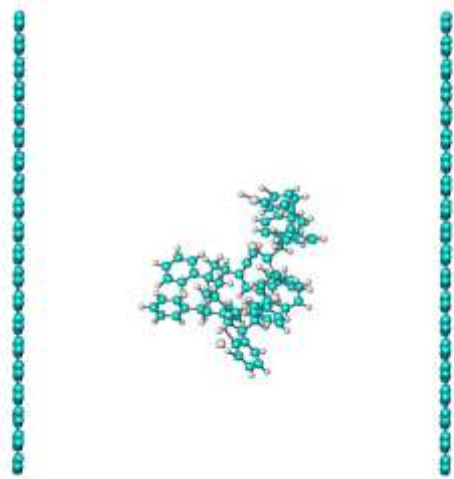


Рис.3. Расположение между двумя жестко закрепленными графеновыми пластинами допированного полистирола

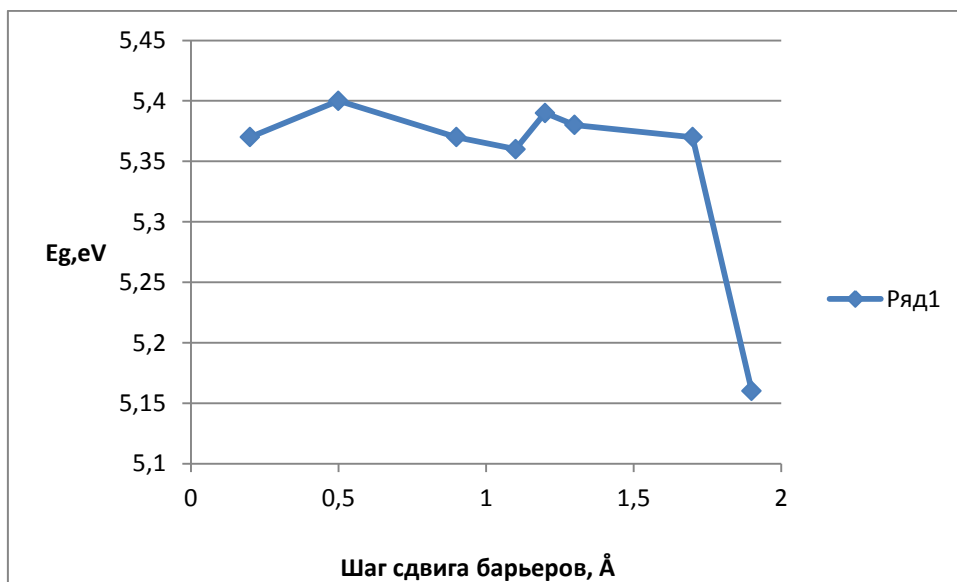


Рис.4. Шаг сдвига графеновой пластины и электронные свойства допированного полистирола

Использование полимерных матриц и гибких подложек позволяет реализовать в этих структурах высокую чувствительность, низкие уровни шумов, простоту управляющей электроники, приемлемую стоимость.

Следовательно, можно заключить, что процесс допирования композита и процесс сжатия можно использовать в качестве способа управления изменением проводимости композитного материала, входящего в состав датчиков давления.

*Работа выполнена при финансовой поддержке гранта РФФИ (проект 18-07-00752 А).*

### *Список использованной литературы*

1. Смирнов А.В., Аткин В.С., Гребенников А.И., Ревзина Е.М., Кондратьева О.Ю., Синёв И.В. Получение сферических микрочастиц вольфрама в поле ультразвуковой волны в присутствии активатора // Известия Саратовского университета. Новая серия. Серия: Физика. 2015. Т. 15. № 4. С. 13-17.
2. Колесникова А.С., Глуховской Е.Г., Кондратьева О.Ю. // В сборнике: Практическая биомеханика материалы докладов Всероссийской конференции молодых ученых с международным участием, Саратов, 2017. С. 73-74.
3. Кондратьева О.Ю., Терин Д.В., Ревзина Е.М. Информационные технологии: исследовательские расчеты в среде mathcad. Введение // Учебно-методическое пособие / Mauritius, 2018.
4. Кондратьева Е.В., Кондратьева О.Ю. Экономический анализ эффективности прогнозирования успеваемости на основе FUZZY LOGIC // В сборнике: Экономическая наука в Саратовском университете: прошлое и современность Материалы Международной конференции в рамках Международного научного симпозиума, посвященного 100-летию гуманитарного образования в СГУ "Столетие гуманитарного образования в Саратовском государственном университете: диалог времен - прошедшего, настоящего и будущего". Под редакцией О.Ю. Челноковой. 2017. С. 30-32.
5. Лунёва А.Д., Колесникова А.С., Ву Х.А., Сафонов Р.А., Кириллова И.В., Коссович Л.Ю. Подбор весовых коэффициентов в рамках метода активных контуров для создания твердотельных моделей костных систем // В сборнике: Методы компьютерной диагностики в биологии и медицине - 2017 Материалы Всероссийской школы-семинара. Под редакцией Д.А. Усанова. 2017. С. 103-105.

*Д.А. Максина, В.Ф. Названов*

Саратовский национальный исследовательский государственный университет имени Н.Г. Чернышевского

## **СПЕКТРЫ ОТРАЖЕНИЯ ОДНОМЕРНЫХ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ФОТОННЫХ КРИСТАЛЛОВ С ДЕФЕКТНЫМ СЛОЕМ ИЗ АКТИВНОЙ ГЕТЕРОГЕННОЙ СРЕДЫ МЕТАЛЛ – ДИЭЛЕКТРИК**

В представленной статье изложены результаты компьютерного моделирования спектров отражения одномерных диэлектрических фотонных кристаллов с дефектным слоем из активной гетерогенной среды металл – диэлектрик.

**Ключевые слова:** фотонные кристаллы, дефектные слои в фотонных кристаллах, активные гетерогенные среды, состоящие из металлических наночастиц, взвешенных в лазерной среде.

**Актуальность темы.** На сегодняшний день одной из наиболее интенсивно развивающихся областей науки является направление по созданию и исследованию фотонных кристаллов – искусственных периодических структур

с периодом, сравнимым с длиной волны распространяющегося в них электромагнитного излучения. По аналогии с реальными кристаллами в фотонных кристаллах существуют разрешенные и запрещенные для распространения электромагнитного излучения частотные области, называемые фотонными запрещенными зонами [1].

Уникальные свойства фотонных кристаллов, обусловленные резонансным взаимодействием электромагнитной волны с периодической структурой, позволяют создавать на их основе новые типы структур и устройств с управляемыми параметрами, а также реализовать новые высокочувствительные методы измерения параметров материалов.

Большой интерес представляют так называемые композитные среды с наночастицами металлов при создании наноструктурных металл-диэлектрических фотонных кристаллов и новых способов управления светом на их основе [2-3]. Спектральные свойства 1D ФК с включением в качестве структурного элемента резонансного слоя пассивного гетерогенной среды, состоящей из металлических частиц взвешенных в диэлектрической прозрачной матрице, изучались в работе [4].

Целью настоящей работы являлось компьютерное моделирование спектров отражения 1D- диэлектрических фотонных кристаллов с дефектным слоем из активной гетерогенной среды металл- диэлектрик.

#### 1. Анализ оптических свойств гетерогенных сред металл-диэлектрик [2-3].

В настоящее время огромный интерес исследователей во всем мире привлекают гетерогенные среды, состоящие из ансамбля металлических или полупроводниковых наночастиц, находящихся в оптически прозрачной диэлектрической матрице.

Методы получения таких структур, включая, ионную имплантацию, химическое легирование и другие комплексные методики интенсивно разрабатываются в ведущих научных центрах. Такие среды могут иметь аномально высокий коэффициент преломления, значительно превосходящий достижимые в настоящее время значения, что позволит создать

микроминиатюрные лазеры, нелинейные преобразователи частоты излучения и ряд других устройств. Такие системы весьма перспективны для разработки нового поколения устройств интегральной оптики и оптоэлектроники, так как для них характерен нелинейный отклик на воздействие фемтосекундного лазера.

Кратко рассмотрим оптические, в частности, резонансные, свойства гетерогенной среды, состоящей из малых металлических шаров, распределенных в другом материале.

Для указанных сред используется в формула Максвелла – Гарнета [3]

$$\frac{\varepsilon_{\text{mix}}(\lambda) - \varepsilon_{\text{m}}(\lambda)}{\varepsilon_{\text{mix}}(\lambda) + 2\varepsilon_{\text{m}}(\lambda)} = \sum_j \eta_j \frac{\varepsilon_{\text{bj}}(\lambda) - \varepsilon_{\text{m}}(\lambda)}{\varepsilon_{\text{bj}}(\lambda) + 2\varepsilon_{\text{m}}(\lambda)}. \quad 2.1$$

Она получена для среды, составленной из шаров, распределенных в материале с диэлектрической проницаемостью  $\varepsilon_{\text{m}}(\lambda)$ ;  $\varepsilon_{\text{bj}}(\lambda) = \varepsilon'_{\text{bj}}(\lambda) + i\varepsilon''_{\text{bj}}(\lambda)$  - диэлектрическая проницаемость материала, из которого изготовлены шары j-го сорта;  $\eta_j$  - относительный объем, занимаемый в смеси шарами j-го сорта;  $\lambda$ - длина волны излучения в вакууме. Рассмотрим смесь, состоящую из наночастиц, радиусы которых лежат в диапазоне нескольких нанометров, одного сорта. Введем обозначение [3]

$$F(\lambda, \eta) = \eta \frac{\varepsilon_{\text{b}}(\lambda) - \varepsilon_{\text{m}}(\lambda)}{\varepsilon_{\text{b}}(\lambda) + 2\varepsilon_{\text{m}}(\lambda)} \quad 2.2$$

Тогда из формулы (2.2) следует, что

$$\varepsilon_{\text{mix}}(\lambda) = \varepsilon_{\text{m}} \frac{1 + 2F(\lambda, \eta)}{1 - F(\lambda, \eta)}. \quad 2.3$$

Хотя смесь металлических наночастиц с прозрачным материалом может иметь большой показатель преломления, ему будет сопутствовать и большое поглощение.

Скомпенсировать мнимую часть диэлектрической проницаемости металла можно при использовании в качестве матрицы лазерной среды, для



которой

$$\varepsilon_m(\lambda) = n_m^2 - g^2 - 2in_m g, \quad 2.4$$

где  $n_m$  - показатель преломления лазерной среды;  $g$ - умноженный на  $\lambda/2\pi$  коэффициент усиления. Считается, что коэффициент усиления обнаруживает сравнительно узкий резонанс на длине волны  $\lambda_0$ .

## 2. Результаты компьютерного моделирования спектров отражения одномерных фотонных кристаллов

В данном разделе приведены результаты компьютерного моделирования спектров отражения одномерных фотонных кристаллов как бездефектных, так и с дефектами, в качестве которых использованы слои из пассивных и активных гетерогенных сред, описанных в предыдущем разделе. При моделировании использовался метод характеристических матриц [1,5].

### 2.1. Спектры отражения одномерных фотонных кристаллов с дефектным слоем из пассивной гетерогенной среды металл- диэлектрик

В качестве 1D фотонного кристалла использовалась периодическая структура  $ZrO_2 - SiO_2$  (с диэлектрическими слоями с показателями преломления  $n_2$  и  $n_3$ , соответственно), при числе периодов  $N=10$ , коэффициенте преломления матрицы  $n_m=1,58$ , толщинах слоев для двуокиси циркония  $h_2= 53$  nm, двуокиси кремния  $h_3 =78$ nm, гетерогенной среды  $h_d=130$ nm, нулевом угле падения света, факторе заполнения  $\eta=0,1322$ .

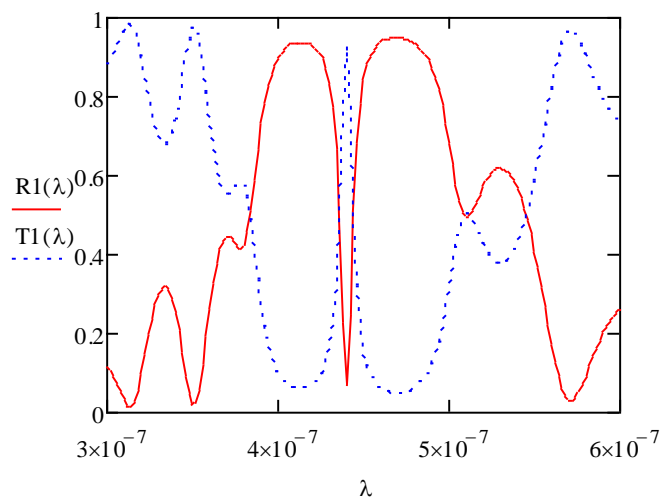


Рис.2.1 Спектры отражения и пропускания 1D- ФК с пассивным дефектным слоем (серебряные наночастицы, взвешенные в прозрачной матрице, при факторе заполнения  $\eta=0.1322$  и нулевом усилении  $g=0$ ).

Как можно видеть из рисунка 2.1, в спектре отражения 1-D ФК, как и ожидалось, появляется дефектная полоса.

## 2.2. Результаты моделирования спектров отражения одномерных фотонных кристаллов с дефектным слоем из активной гетерогенной среды металл- диэлектрик

В качестве 1D фотонного кристалла использовалась та же периодическая структура  $ZrO_2 - SiO_2$  с теми же параметрами, но с активным дефектным слоем с коэффициентом усиления  $g=0,065$ .

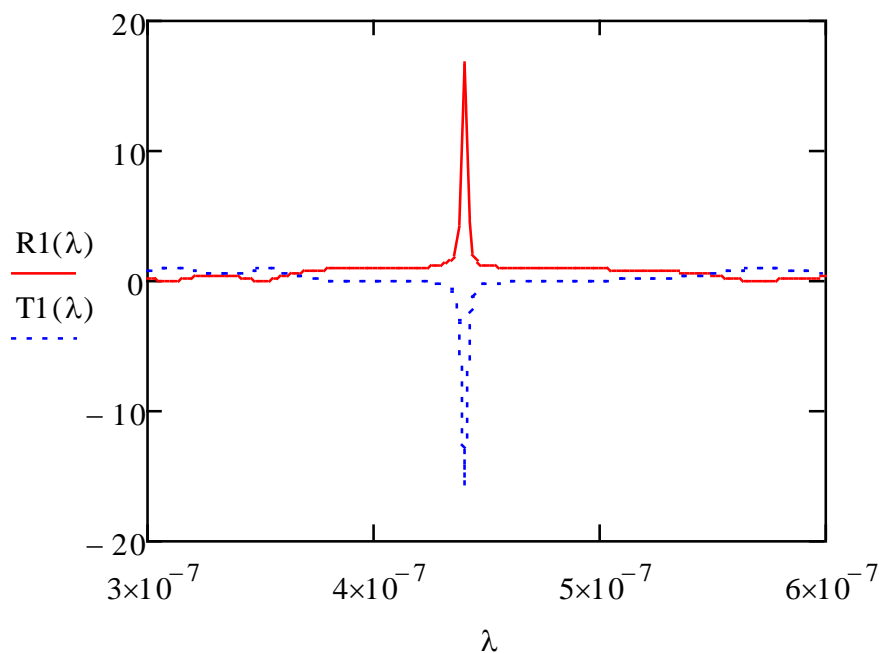


Рис.2.2 Спектры отражения и пропускания 1D- ФК с активным дефектным слоем (серебряные наночастицы, взвешенные в активной матрице, при факторе заполнения  $\eta=0.1322$  и усилении  $g=0.065$ )

Как можно видеть из рисунка 2.2, при значении  $g=0.065$  (коэффициент усиления наблюдается значительное возрастание коэффициента отражения в дефектной полосе спектра отражения).

### Заключение

Результаты моделирования показывают, что при изменении

коэффициента усиления активной среды (нанокомпозита металл – диэлектрик) при заданной величине фактора заполнения проявляется эффект значительного увеличения коэффициента отражения излучения в дефектной полосе 1D-ФК.

*Список использованной литературы*

1. Названов В.Ф. Фотонные кристаллы в примерах и задачах. - Саратов: изд-во ООО «Новый ветер», 2015.-144с.
2. Ораевский А.Н., Проценко И.Е. Высокий показатель преломления и другие особенности оптических свойств гетерогенных сред.//Письма в ЖЭТФ. 2000. Том 72. Вып. 9. С. 641 – 646.
3. Ораевский А.Н., Проценко И.Е. Оптические свойства гетерогенных сред. // Квантовая электроника. 2001. Том 31. № 3. С. 252 – 256.
4. Ветров С.Я., Авдеева А.Ю., Тимофеев И.В. Особенности спектральных свойств одномерного фотонного кристалла с резонансным дефектным слоем нанокомпозита.// ЖЭТФ. 2011. Том 140. Вып. 5 (11). Стр. 871 -878.
5. Борн М., Вольф Э. Основы оптики. –М.: Наука, 1970. 855 с.

*А.И. Михайлов, В.Ф. Кабанов, М.В. Гавриков*

Саратовский национальный исследовательский государственный университет  
имени Н.Г. Чернышевского

## **МЕТОДИКА АНАЛИЗА ПАРАМЕТРОВ НАНОЧАСТИЦ ПОЛУПРОВОДНИКОВ ГРУППЫ $A^3B^5$**

Приведены прямые (с помощью сканирующего электронного микроскопа и лазерного анализатора размера частиц) и косвенные (по анализу дифференциальных нормированных туннельных вольтамперных характеристик (ВАХ) методы оценки размеров наночастиц полупроводников группы  $A^3B^5$ , которые показали качественно и количественно согласованные результаты с погрешностью не более 10 %. Сделан вывод о том, что метод анализа туннельных дифференциальных ВАХ является эффективным методом экспресс-анализа, который может быть использован при изучении квантово-размерных объектов.

**Ключевые слова:** наночастицы, арсенид галлия, антимонид индия, туннельные вольтамперные характеристики, квантовая точка.

Исследования синтеза и свойств полупроводниковых наночастиц имеют возрастающее значение для развития технологий и применений материалов в электронике [1]. В литературе малочисленны работы с использованием наночастиц полупроводниковых соединений  $A^3B^5$ , которые, однако, имеют самое широкое сочетание свойств и определяют развитие таких важных

направлений, как оптоэлектроника и микроэлектроника. Такие свойства полупроводников группы  $A^3B^5$ , как экстремально малые величины эффективной массы электрона, приводят к проявлению квантово-размерных эффектов в наночастицах сравнительно больших размеров, что важно для практики [2, 3].

В данной работе представлены некоторые результаты исследований полупроводниковых наночастиц группы  $A^3B^5$  (*GaAs*, *InSb*), проводимых на факультете nano- и биомедицинских технологий СГУ.

Образцы наночастиц рассматриваемых полупроводников были получены по оригинальной технологии и перенесены на твердые подложки с проводящим слоем индий-оловянного оксида (ИТО). Полученные пленочные образцы были исследованы методами сканирующей электронной микроскопии (СЭМ), сканирующей туннельной микроскопии (СТМ), анализа размеров частиц с помощью Malvern Mastersizer 2000.

Методы СЭМ и оптической спектроскопии не всегда могут обеспечить однозначную интерпретацию экспериментальных данных в случаях, когда квантовая частица не является однородной по структуре или несколько частиц образуют конгломерат. В связи с этим для более полного анализа особенностей электрофизических свойств полученных пленочных образцов с наночастицами, в частности электронного спектра, в данной работе использован метод СТМ. Исследования проводились с помощью сканирующего зондового микроскопа СЗМ НАНОЭДЬЮКАТОР-2. После анализа полученного СТМ образа поверхности макрообразца выбиралось не менее 10 точек для снятия ВАХ. В автоматическом режиме измерялись не менее 10 ВАХ на точку. Измерения ВАХ проводились в пределах величин тока - от  $10^{-11}$  до  $10^{-7}$  А, напряжения – от 0 до 5 В. По воспроизводимости результатов измерений отбирались точки с устойчивыми характеристиками. Для анализа экспериментальных туннельных ВАХ использовалась зависимость  $(dI/dV)/(I/V)$  от напряжения  $V$  [4, 5].

Электронные и оптические свойства полупроводниковых наночастиц (в частности, ширина запрещенной зоны, длина волны излучения и поглощения,

коэффициент экстинкции) зависят от размеров полупроводниковых наночастиц, которые при определенных условиях (характерный размер наночастицы меньше длины волны де Бройля для рассматриваемого материала) можно аппроксимировать моделью квантовой точки (КТ).

Электрон в КТ ведет себя, как в трехмерной потенциальной «яме». В этом случае электронный спектр энергий представляется набором уровней для электронов и дырок с интервалом между ними, пропорциональным  $1/a^2$ , где  $a$  – характерный геометрический размер квантовой точки. Изменяя размеры квантовой точки можно управлять ее проводимостью, частотами межуровневых переходов или длиной волны поглощения и испускания.

Одним из наиболее важных физических эффектов, определяющих электропроводность образцов с наноструктурированной поверхностью, является туннелирование. Модельные представления процесса туннелирования электронов через дискретные уровни квантово-размерного объекта в структуре, характерной для СТМ-измерений, отображены на рис. 1 *a, b*. При приложенных напряжениях  $V_1$  и  $V_2$ , происходит туннелирование электронов через соответствующие энергетические уровни дискретного спектра наночастицы, а далее – туннелирование через вакуум зазора в металлический зонд.

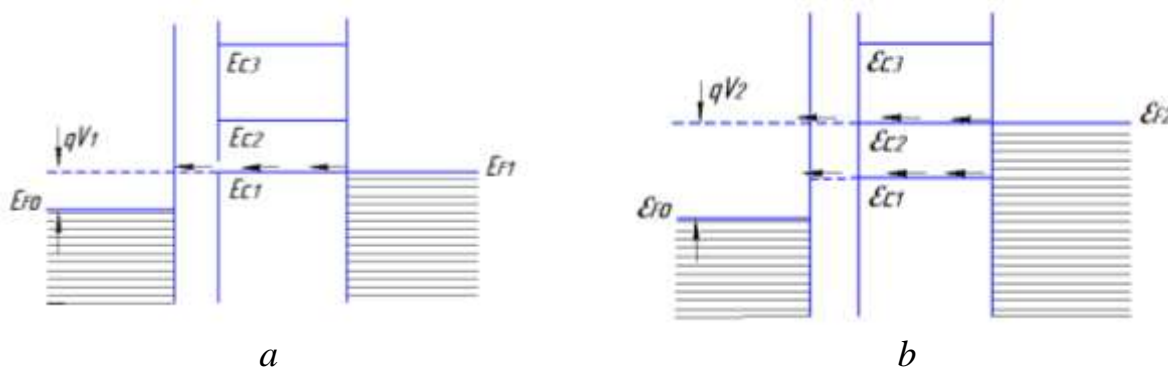


Рис. 1. Туннелирование электронов через уровни квантовой точки.

При использовании модели КТ кубической формы с ребром  $a$  положение уровней энергетического спектра КТ может быть представлено:

$$\mathcal{E}_i = \frac{(\pi \eta)^2}{2m^*} \cdot \frac{1}{a^2} \cdot (l^2 + m^2 + n^2), \quad (1)$$

где  $l, m, n = 1, 2, 3, \dots$  – положительные числа, соответствующие номерам

уровней;  $m^*$  – эффективная масса электрона,  $a$  – характерный размер КТ.

В ходе исследований рассматривались и анализировались нормированные дифференциальные туннельные ВАХ при отрицательном потенциале смещения на подложке относительно зонда. В этом случае происходит туннелирование электронов из электрода ИТО через дискретные уровни квантово-размерного объекта в зонд туннельного микроскопа. Результаты представлены на рис. 2 *a*, *b*. (сплошная линия – линия тренда).

Дискретный спектр энергии электронов проводимости квантово-размерного объекта обуславливает пики на нормированных дифференциальных ВАХ (на рис. 2 *a*, *b* указаны стрелками).

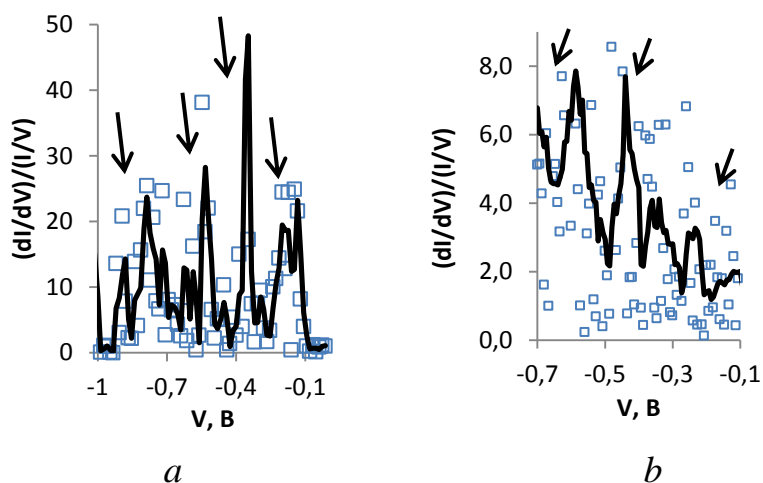


Рис. 2. Типичные дифференциальные туннельные ВАХ наночастиц *GaAs(a)* и *InSb(b)*

Полученные значения максимумов на нормированных дифференциальных ВАХ ставились в соответствие с расчетными уровнями энергетического спектра с погрешностью до  $2kT$  (выделенная область на рис. 3 *a, b*).

Оценки размеров наночастиц *GaAs* по методу сопоставления расчета электронного спектра (по модели «кубической» КТ) с анализом экспериментальных туннельных ВАХ находились в диапазоне 8 - 11 нм.

В качестве независимого анализа были проведены непосредственные измерения при помощи СЭМ. Результаты, представленные на рис. 4, показывают хорошее согласование с расчетными размерами КТ.

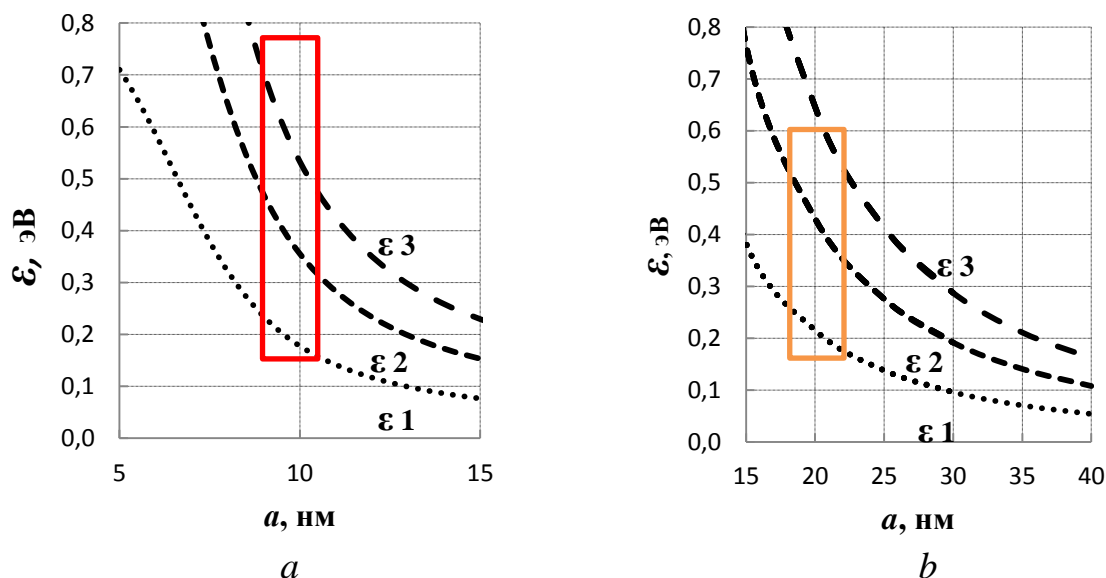


Рис. 3. Расчетные значения энергии электрона проводимости для первых четырех разрешенных уровней КТ  $GaAs(a)$   $InSb(b)$  в зависимости от характерного размера  $a$  по модели «кубической» КТ

Оценки размеров наночастиц  $InSb$  по методу сопоставления расчета электронного спектра (по модели «кубической» КТ) с анализом экспериментальных туннельных ВАХ находились в диапазоне 18 - 22 нм.

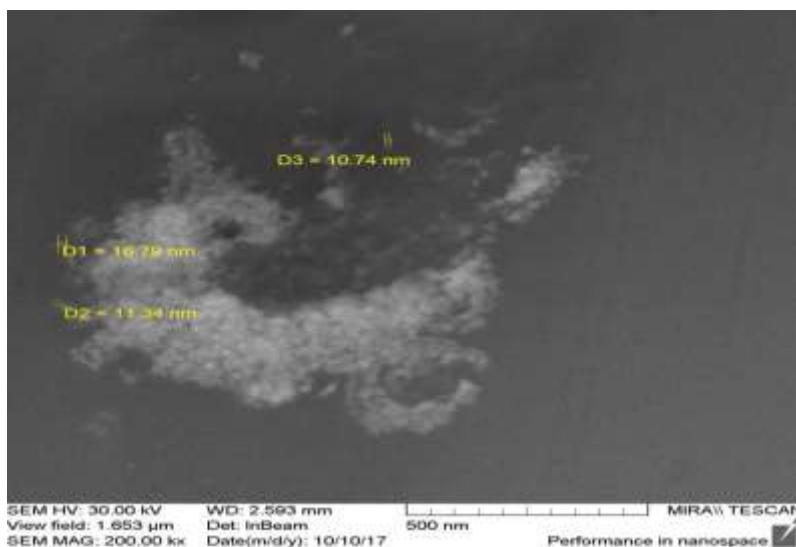


Рис.4. Типичные СЭМ изображения КТ  $GaAs$

Результаты исследований растворов наночастиц  $InSb$  с помощью лазерного анализатора размера частиц Malvern Mastersizer 2000 представлены на рис. 5.

Полученные результаты исследований показали величину характерных размеров наночастиц в диапазоне 19 – 23 нм.

Обработка группы исследуемых образцов ( $GaAs$ ,  $InSb$ ) показала, что

расчетные значения оценок характерных размеров наночастиц, полученные при различных подходах, находятся в хорошем качественном и количественном согласии.

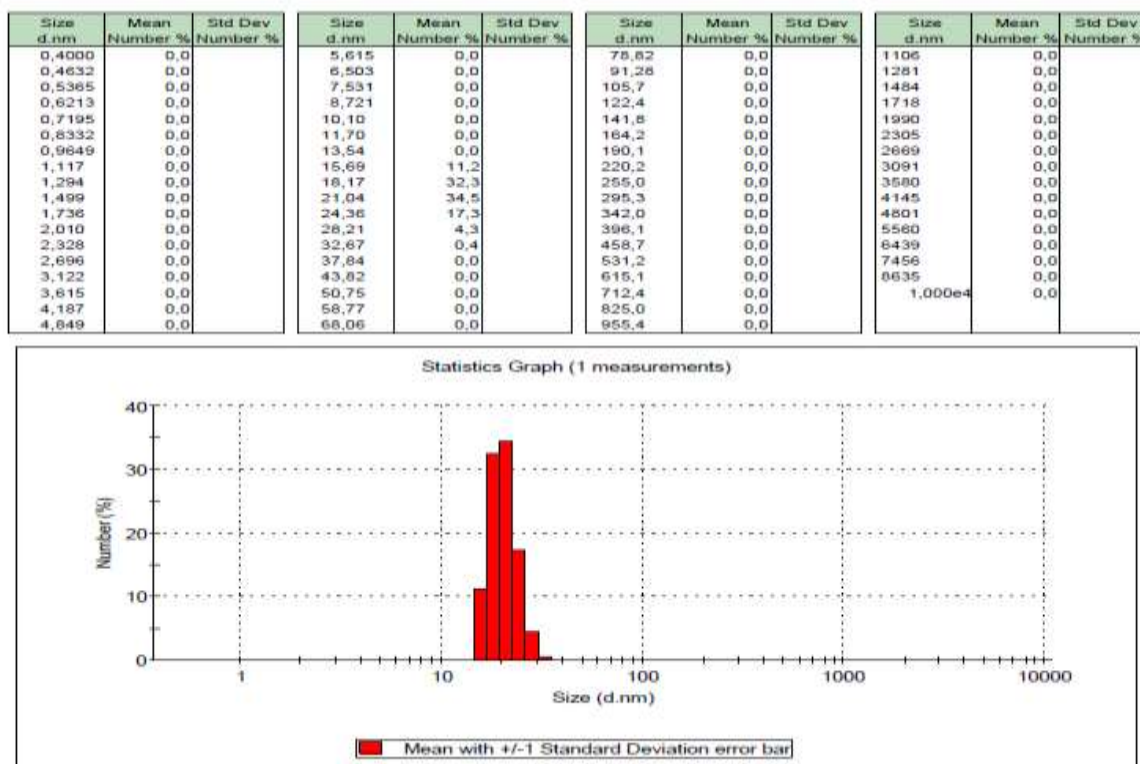


Рис. 5. Оценка размеров наночастиц *InSb* с помощью лазерного анализатора размера частиц

На основании анализа оценок размеров исследуемых наночастиц можно сделать вывод. Прямые (с помощью сканирующего электронного микроскопа и лазерного анализатора размера частиц) и косвенные (по анализу спектральных характеристик и дифференциальных нормированных туннельных ВАХ) методы оценки характерных размеров наночастиц показали качественно и количественно согласованные результаты с погрешностью не более 10 %. Метод анализа дифференциальных нормированных туннельных ВАХ может также использоваться для анализа механизмов проводимости исследуемых структур, расчета параметров и ряда других важных электронных процессов. Все это позволяет считать, что метод анализа туннельных дифференциальных ВАХ является эффективным методом экспресс-анализа, который может быть использован при изучении квантово-размерных объектов.



Работа выполнена при поддержке грантов РФФИ № 16-07-00093 и № 16-07-00185.

*Список использованной литературы*

1. Дорофеев С.Г., Кононов Н.Н., Звероловлев В.М. Применение тонких пленок из наночастиц кремния для увеличения эффективности солнечных элементов // ФТП. 2014. Т.48. В.3. С.375 - 383.
2. Михайлов А.И., Кабанов В.Ф., Жуков Н.Д. Проявление размерного квантования на выступах шероховатой поверхности полупроводников АЗВ5. Письма в ЖТФ. 2015. Т.41. В.21. С.88-94.
3. Angela Y. Chang et al. Carrier Dynamics in Highly Quantum-Confined, Colloidal Indium Antimonide Nanocrystals // ACS Nano. 2014. V.8. №8. P.8513-8519.
4. Wang T., et al. Size-dependent energy levels of InSb quantum dots measured by scanning tunneling spectroscopy // ACS Nano. 2015. V.9. №1. P.725-732.
5. Mikhailov A.I., Kabanov V.F., Zhukov N.D., Glukhovskoy E.G. Features of the energy spectrum of indium antimonide quantum dots // Nanosystems: physics, chemistry, mathematics. 2017. V.8. №5. P.596-599.

*А.И. Михайлов, А.В. Митин, И.О. Кожевников*

Саратовский национальный исследовательский государственный университет  
имени Н.Г. Чернышевского

**ГАННОВСКАЯ И РЕКОМБИНАЦИОННАЯ НЕУСТОЙЧИВОСТИ  
ТОКА В ВЫСОКООМНЫХ МНОГОДОЛИННЫХ  
ПОЛУПРОВОДНИКАХ В УСЛОВИЯХ  
ОПТИЧЕСКОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ:  
МОДЕЛИРОВАНИЕ, ОСНОВНЫЕ СВОЙСТВА, ПРИМЕНЕНИЕ**

В статье кратко охарактеризованы история и современное состояние исследований ганновской и рекомбинационной неустойчивостей тока в структурах на основе многодолинных широкозонных высокоомных полупроводников в условиях локализованного или однородного оптического воздействия, проводимых на кафедре физики полупроводников Саратовского университета. Рассмотрены наиболее значимые результаты математического моделирования, экспериментальных исследований, проведено обсуждение возможных вариантов функциональных электронных компонентов на основе исследуемых неустойчивостей.

**Ключевые слова:** эффект Ганна, рекомбинационная неустойчивость тока, сильные электрические поля, полуизолирующий полупроводник, широкозонный полупроводник, воздействие оптического излучения, функциональная электроника.

В современной науке значительный исследовательский интерес

сосредоточен на нелинейных эффектах, процессах и системах. Так развитие физики нелинейных явлений и математических нелинейных моделей способствовало становлению во второй половине XX столетия новой научной дисциплины – нелинейной динамики, занимающейся исследованием процессов в различных нелинейных динамических системах (физических, биологических, экономических, социальных и т.д.). Фундаментальный научный интерес таких исследований обусловлен стремлением к установлению внутренних динамических закономерностей и выявлению общности в поведении нелинейных систем различной природы. Практический же интерес связан, прежде всего, с открывающимися перспективами применения полученных знаний для эффективного прогнозирования, синтеза и управления процессами в различных нелинейных динамических системах.

Многодолинные широкозонные полупроводники являются нелинейными активными средами, а структуры на их основе – нелинейными физическими системами, в которых в сильных электрических полях возможно проявление нескольких принципиально различных по физической природе механизмов развития неустойчивости тока. К числу таковых, в частности, относятся *междолинный перенос электронов* в зоне проводимости из долины с их большей в долину с меньшей подвижностью, приводящий к известному *эффекту Ганна*, а также захват электронов проводимости глубокими уровнями примесных центров в запрещенной зоне, являющийся разновидностью так называемой *рекомбинационной неустойчивости* тока, или *концентрационной нелинейности*. В обоих случаях развитие неустойчивости тока может приводить к появлению участка отрицательной дифференциальной проводимости (ОДП) на вольт-амперной характеристике исследуемых образцов и возникновению в цепи образца осцилляций тока, параметры и характеристики которых определяются механизмом их возникновения, а также чувствительны к внешним физическим воздействиям. Несмотря на более чем полувековую историю исследований [1] особенностей проявления этих типов неустойчивости тока в указанных нелинейных физических системах, в том

числе в условиях внешних воздействий, их актуальность не ослабевает и в настоящее время по причине сложности, многофакторности исследуемых систем и, как следствие, противоречивости получаемых данных, а, главное, в связи с открывающимися в настоящее время вследствие доступности и стремительного развития технологий широких возможностей применения таких неустойчивостей в функциональной электронике.

Исследования нелинейной динамики пространственного заряда и тока в длинных структурах на основе многодолинных широкозонных высокоомных полупроводников, таких как GaAs, CdTe, в условиях внешнего оптического воздействия активно проводятся на кафедре физики полупроводников Саратовского университета с начала 2000-х годов. Подробное рассмотрение наиболее важных результатов этих исследований и анализ современного состояния проблемы проводился в обзоре [1]. Многодолинность и большая ширина запрещенной зоны полупроводников ( $\sim 1,43$  и  $1,49$  эВ для GaAs и CdTe соответственно) расширяют спектр возможных проявлений нелинейной динамики тока в исследуемых структурах, делают такие материалы и структуры особенно интересными для функциональной электроники. Полуизолирующие свойства используемых материалов позволяют обеспечить высокую чувствительность структур на их основе к оптическому излучению из диапазона длин волн, соответствующего собственному или примесному поглощению полупроводника, а большая длина активной области исследуемых структур (по сравнению с промышленно выпускаемыми диодами Ганна) обеспечивает возможность как однородного, так и локализованного оптического воздействия.

Анализ литературы показал [1], что в последние два десятилетия в исследованиях фотоэлектрических явлений в длинных высокоомных образцах многодолинных полупроводников, таких как GaAs, InP, CdTe, в условиях *ганновской неустойчивости* тока основной акцент делается на изучении особенностей, связанных с воздействием на полупроводниковые образцы пространственно-неоднородного и переменного во времени оптического

излучения, что прежде всего обусловлено возможными перспективами использования этих эффектов для создания разнообразных функциональных устройств приема, преобразования, передачи и хранения сложных информационных сигналов как в оптическом и ИК, так и в СВЧ и КВЧ диапазонах.

В работе [2] была экспериментально продемонстрирована возможность формирования освещением когерентных колебаний фототока в высокоомных образцах на основе GaAs. Проведенное совместно с автором [2] сотрудниками кафедры физики полупроводников исследование показало значительное влияние напряжения питания и засветки образца на спектр выходного сигнала [1]. Эксперименты проводились на монокристаллических объемных образцах GaAs и CdTe с высоким удельным сопротивлением (до 108 Ом·см) и длиной активной области от сотен мкм до нескольких мм. Контакты к образцам создавались на основе Au. Значения частот наблюдаемых осцилляций указывали на их обусловленность эффектом Ганна.

В работах [3,4] была построена и развита одномерная локально-полевая математическая модель, позволяющая исследовать особенности нелинейной динамики пространственного заряда и тока при *ганновской неустойчивости* в длинных (с длиной активной области порядка нескольких сотен мкм) высокоомных (с концентрацией доноров от  $10^{12}$  до  $10^{13}$  см<sup>-3</sup>) образцах *n-GaAs* в темновом случае и в условиях однородной или локализованной засветки образца оптическим излучением из диапазона длин волн, соответствующего собственному поглощению арсенида галлия. На основе разработанной локально-полевой математической модели была проведена серия численных экспериментов по исследованию влияния величины постоянного напряжения, длины и степени легирования активной области структуры, интенсивности и локализации засветки, а также величины времени жизни неравновесных носителей заряда на спектральный состав полного тока [4].

Математическое моделирование, проведенное в [4], позволило установить, что на спектр полного тока в наибольшей степени оказывает влияние локальная

засветка исследуемой структуры в середине активной области. Анализ нелинейной динамики пространственного заряда показал, что в этом случае в различных частях структуры возможно одновременное существование нескольких областей сильного поля разных типов (дипольных доменов и обогащенных слоев), форма, размеры и скорость которых существенно зависят от величины приложенного постоянного напряжения  $U_0$ . Кроме того, в работе было установлено, что увеличение интенсивности засветки может приводить к возрастанию частоты генерируемых колебаний и значительным изменениям в спектральном составе выходного сигнала. Помимо этого, на основе полученных данных был сделан вывод о том, что заметную роль в динамике формирования, движения и исчезновения областей сильного поля в структуре в условиях засветки играют рекомбинационные процессы. Их влияние оказалось существенным в случае сопоставимости времени пролета сформированной области сильного поля через активную область структуры и времен жизни неравновесных электронов и дырок, генерируемых светом. Этот факт проявился наиболее ярко в поведении высших гармонических составляющих тока.

Дальнейшие экспериментальные исследования были направлены на установление особенностей проявления неустойчивостей тока в длинных высокоомных планарно-эпитаксиальных структурах на основе арсенида галлия [1,5]. Переход к исследованиям таких структур был основан на идее о том, что синтез систем с управляемыми динамическими неоднородностями с использованием планарной технологии может позволить совместить неоспоримые достоинства интегральной электроники с большими возможностями функциональных компонентов.

В ряде наших экспериментальных исследований [1,5] было установлено, что в длинных высокоомных планарно-эпитаксиальных структурах на основе  $n$ -GaAs возможно наблюдение отрицательной дифференциальной проводимости и соответствующих низкочастотных осцилляций тока, частота которых оказалась существенно меньше теоретически рассчитанной частоты ганновских

колебаний для структур с длиной активной области от 300 до 1000 мкм. Напряженность порогового поля, рассчитанная для исследуемых структур, оказалась примерно в 6 раз меньше порогового поля эффекта Ганна. Также было установлено, что частота, амплитуда и форма генерируемых токовых колебаний в существенной степени определяются величиной приложенного напряжения, локализацией и интенсивностью засветки активной области структуры, технологическими условиями изготовления. Увеличение приложенного напряжения приводило к монотонному увеличению амплитуды низкочастотных колебаний тока, уменьшению частоты и усложнению их спектрального состава. Локализация засветки активной области структуры существенно изменяла форму наблюдаемых токовых колебаний.

В одной из последующих работ было показано [1], что особенности возникновения и развития рекомбинационных неустойчивостей тока в исследуемых структурах, а также чувствительность параметров соответствующих им токовых осцилляций к внешнему оптическому воздействию определяются такими факторами, как длительность импульса и полярность приложенного напряжения, а также селективность и скорость травления используемого при изготовлении структуры травителя.

В ходе экспериментального исследования [5] были установлены факторы, в наибольшей степени влияющие на возникновение устойчивых колебаний тока в длинных высокоомных планарно-эпитаксиальных структурах на основе арсенида галлия n-типа: расстояние между анодным контактом и областью инжекции, локализация и симметричность расположения стравленной области относительно контактов, а также тип контакта и марка исходной пластины.

Теоретический анализ, в частности, на базе локально-полевой математической модели показал [1], что возникновение наблюдаемых низкочастотных токовых осцилляций в исследуемых структурах в наибольшей степени соответствует физическому механизму зависящего от электрического поля захвата свободных электронов глубокими примесными уровнями в запрещенной зоне полупроводника и образованию медленных доменов

сильного электрического поля, то есть проявлению неустойчивости тока рекомбинационного типа.

Разработанная в [3] локально-полевая математическая модель была усовершенствована в ряде последующих работ [1] и позволила исследовать динамику электронных процессов в длинных высокоомных структурах  $n^+ - n^- - n^- - n^+ - GaAs$  в условиях зависящего от электрического поля захвата свободных электронов глубокими примесными уровнями. Проведенные с использованием разработанного варианта модели численные эксперименты показали, что в исследуемых структурах возможно возникновение низкочастотных колебаний тока, спектр которых определяется преимущественно процессами захвата и генерации свободных носителей заряда, происходящими с участием глубоких примесных уровней. В ходе математического моделирования было установлено, что параметры генерируемых рекомбинационных неустойчивостей тока определяются значениями концентрации глубоких примесных центров, коэффициента захвата свободных электронов и скорости тепловой генерации захваченных электронов с глубокого уровня. Также были проведены численные расчеты для двух зависимостей дрейфовой скорости электронов от напряженности электрического поля (с наличием участка отрицательной дифференциальной подвижности и без него), исследованы основные особенности динамики пространственного заряда в случае «чистой» концентрационной (рекомбинационной) неустойчивости тока и при одновременном действии двух механизмов неустойчивости (дрейфового и концентрационного). Однако в ходе проведенных исследований не были установлены пограничные значения концентрации глубоких примесных уровней  $N_T$ , соответствующие возникновению в структуре устойчивых высокочастотных (обусловленных преимущественно дрейфовым механизмом) и низкочастотных (обусловленных преимущественно концентрационным механизмом) колебаний тока, а также не выявлены особенности динамики заряда и тока в структуре при переходе между режимами, соответствующими разным типам неустойчивостей.

В связи с этим далее [1] исследовалось влияние концентрации глубоких примесных уровней  $N_T$  на характер и доминирующий механизм неустойчивостей тока в длинных высокоомных структурах  $n^+-n^-n-n^+-GaAs$  и определялись пограничные значения  $N_T$  для ганновских и рекомбинационных неустойчивостей тока, а также проводилось исследование особенностей динамики электронных процессов в структуре при промежуточных значениях концентрации примесных уровней.

Как уже отмечалось выше, функциональная микроэлектроника является одним из перспективных направлений развития современной полупроводниковой электроники и использует взаимодействие потоков электронов с волновыми процессами в твердых телах, различные свойства полупроводников, диэлектриков, магнетиков и сверхпроводников в магнитных и электрических полях и др. Динамические неоднородности в твердом теле обеспечивают несхемотехнические принципы работы устройств и представляют значительный интерес для создания принципиально новых приборов функциональной электроники. В частности, использование возможностей функциональной микроэлектроники позволяет заменить сложные интегральные схемы их функциональными аналогами, что в свою очередь дает очевидные преимущества: меньший размер рабочего элемента, простота технологии, снижение энергопотребления и др.

Установление механизмов управления динамикой доменов сильного поля и исследование особенностей проявления этих неустойчивостей в условиях воздействия однородного или локализованного оптического излучения открывают перспективы создания различных электронных, оптоэлектронных и электрооптических элементов и устройств с широкими функциональными возможностями, способных осуществлять прием, обработку, хранение, передачу и отображение сложных информационных сигналов в широком диапазоне частот (от десятков кГц до десятков ГГц).

В связи с этим, исследование существующих и поиск новых полупроводниковых материалов функциональной микроэлектроники



представляет интерес, как с точки зрения фундаментальных научных исследований, так и решения прикладных задач по созданию миниатюрных приборов и устройств нового поколения с улучшенными параметрами.

Возможность применения рекомбинационной неустойчивости тока в функциональной электронике была описана, в частности, в работе [6]. Предложенные авторами фотоэлектрические преобразователи представляют собой эпитаксиальные транзисторные  $p^+n$ -структуры на основе кремния с локальным контактом на  $n$ -области. Авторы показали высокую функциональность и перспективность применения таких фото-преобразователей в оптоэлектронике.

Неустойчивость тока, наблюдаемая в исследуемых на кафедре физики полупроводников высокоомных мезапланарных фоторезисторных структурах на основе промышленных эпитаксиальных пластин арсенида галлия марки САГ-2БК (рис. 1.), по нашему мнению с высокой степенью вероятности связана с образованием динамической неоднородности электрического поля (доменов сильного поля) в результате чередующегося захвата и выброса электронов глубокими безызлучательными центрами в слое объемного заряда в полуизолирующей подложке на границе с эпитаксиальным слоем, образованных компенсирующей примесью или собственными структурными дефектами EL2, и относится к классу рекомбинационных, что подтверждается такими параметрами колебаний тока, регистрируемых во внешней электрической цепи, как: характерная релаксационная форма, высокий уровень выходного сигнала 0,5 – 10 мА, частота, изменяющаяся под действием оптического излучения в диапазоне 10 – 1000 кГц, что соответствует чувствительности порядка 150 кГц/(мВт/мм<sup>2</sup>) [7].

Планарные мезаструктуры были изготовлены с помощью известной технологии создания полевых транзисторов и отличаются от последних отсутствием затвора и активного  $n$ -слоя в промежутке между двумя омическими контактами.

Воздействие излучения в оптическом и ближнем ИК диапазоне длин волн

приводит к линейному росту частоты токовых колебаний. При этом с увеличением напряжения питания выше порогового значения частота токовых колебаний нелинейно уменьшается. Данная особенность позволяет изменять диапазон перестройки частот выходного сигнала или чувствительность (коэффициент частотной модуляции), как показано на рис. 2.

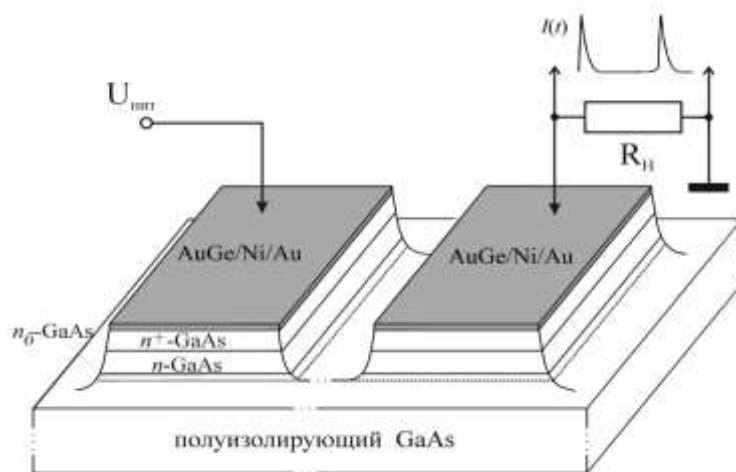


Рис. 1. Вид планарной мезоструктуры с металлическими контактами, подключенной к электрической схеме для регистрации токовых колебаний

Таким образом, рассматриваемая структура может служить основой для создания цифрового измерителя интенсивности (или мощности) оптического излучения с настраиваемой чувствительностью, выходной сигнал которых соответствует импульсно-модулированному с частотной модуляцией (ЧИМ) входному оптическому аналоговому сигналу. Такой ЧИМ-сигнал может распознаваться любым цифровым устройством без предварительного преобразования, как, например, у интегральных преобразователей свет-частота компании Texas Advanced Optoelectronic Solutions (TAOS), содержащих в составе интегральной схемы преобразователь ток-частота.

При величине приложенного напряжения близкой к пороговому значению на зависимостях частоты токовых колебаний от мощности лазерного излучения имеется участок «срыва» генерации (обозначен стрелкой вниз на рис. 2), характеризующийся исчезновением токовых колебаний во внешней электрической цепи. Характерной особенностью данного эффекта является зависимость положения участка «срыва» генерации от величины приложенного

напряжения, что позволяет реализовать функцию оптически управляемого логического ключа, имитирующего логические функции «НЕ», «И-НЕ» и «ИЛИ-НЕ». При этом логическому уровню «1» соответствует выходной сигнал, представляющий периодические колебания тока, а уровню «0» – их отсутствие.

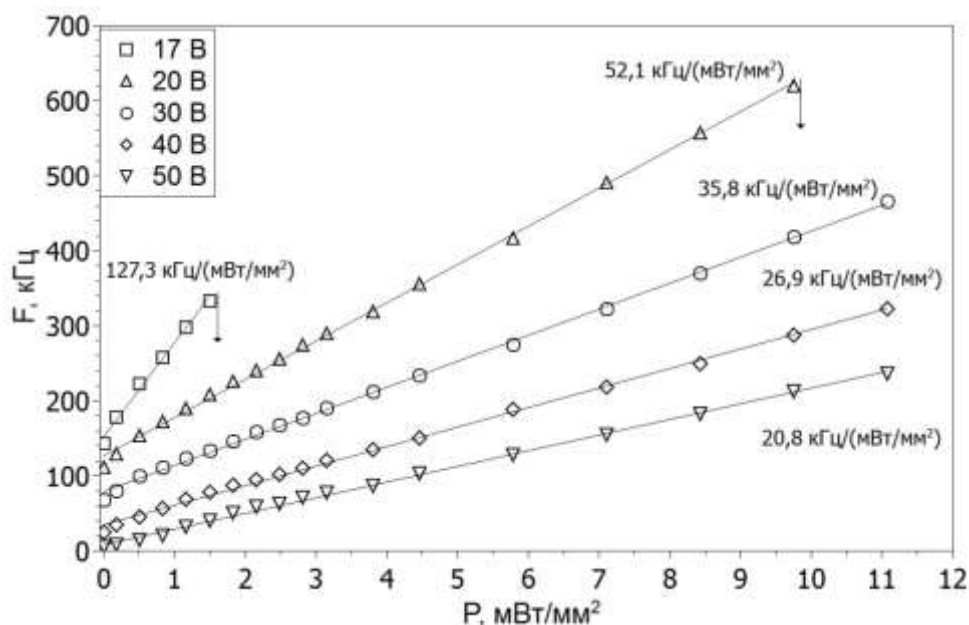


Рис. 2. Зависимость частоты токовых колебаний от мощности лазерного излучения (650 нм) при различных значениях приложенного напряжения

Практический интерес представляет обнаруженный факт, что воздействие магнитного поля на структуру приводит к возрастанию частоты токовых колебаний и их срыву при полях порядка 0,2 Тл. Зависимость частоты от величины магнитного поля может быть аппроксимирована экспонентой (рис. 3).

Параллельное соединение элементов, показанных на рис. 1, приводит к наложению колебаний каждого отдельного элемента в совместном выходном сигнале. При использовании в таких параллельных структурах элементов с различным межконтактным расстоянием приводит к тому, что амплитуды токовых колебаний, а также зависимость частоты от величины освещенности и индукции магнитного поля отдельных структур различаются. Режим импульсного питания позволяет формировать уникальную последовательность импульсов контролируемой длины, перестраиваемую при воздействии засветки

и/или магнитного поля, и согласовывать с цифровыми устройствами. Следовательно, параллельные структуры могут применяться в качестве основы функциональных цифровых позиционно чувствительных фотоэлементов и магнитных датчиков, а также в качестве фото- и магнитоуправляемых формирователей двоичного кодового сигнала в виде характерной последовательности импульсов или шифраторов.

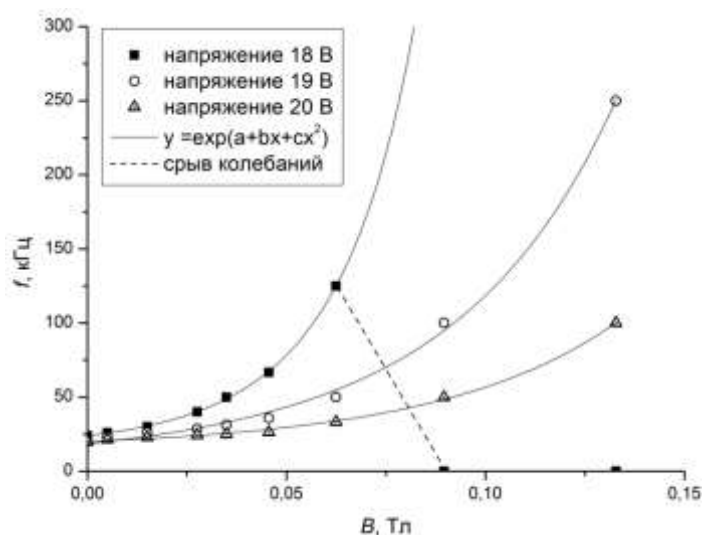


Рис. 3. Семейство характеристик зависимости частоты токовых колебаний от величины магнитной индукции при различном напряжении, приложенном к структуре, индукция магнитного поля ортогональна плоскости активной области структуры

Таким образом, обобщение результатов теоретических и экспериментальных исследований авторов этой работы и анализ данных научно-технической литературы позволяют сделать вывод о том, что исследование особенностей проявления ганновской и рекомбинационной неустойчивостей тока в структурах на основе широкозонных высокоомных многодолинных полупроводников в условиях однородного и стационарного и, в особенности, нестационарного и/или пространственно-неоднородного оптического воздействия является актуальной научной задачей. Перспективные функциональные электронные и оптоэлектронные компоненты, построенные на физических принципах, использующих указанные особенности в сочетании с возможностями современной интегральной технологии, могут обладать улучшенными параметрами и характеристиками и более широким диапазоном

функциональных возможностей по сравнению с известными существующими аналогами схмотехнической интегральной электроники.

#### *Список использованной литературы*

1. Михайлов А.И., Митин А.В., Терентьева А.И. Особенности проявления ганновской и рекомбинационной неустойчивостей тока в высокоомных полупроводниках в условиях оптического воздействия // Полупроводниковая электроника и молекулярные нанотехнологии: Сборник статей / Под общей редакцией проф. А.И. Михайлова. Саратов, 2013. С. 130-153.
2. Perepelitsyn Yu. N. Generation of coherent photocurrent oscillations in GaAs structures with noninjecting contacts by illumination // Transparent Optical Networks, 2<sup>nd</sup> International Conference, June 5-8, 2000. Gdansk, Poland. IEEE Catalog Number 00EX408. P. 143-146.
3. Михайлов А.И., Митин А.В. Анализ нелинейной динамики тока в длинных высокоомных образцах n-GaAs в условиях локальной засветки. Часть 1. Формулировка модели // Физика волновых процессов и радиотехнические системы. 2007. Т. 10. № 2. С.49-56.
4. Михайлов А.И., Митин А.В. Анализ нелинейной динамики тока в длинных высокоомных образцах n-GaAs в условиях локальной засветки. Часть 2. Результаты моделирования // Физика волновых процессов и радиотехнические системы. 2010. Т. 3. № 1. С. 73-81.
5. Михайлов А.И., Митин А.В., Кожевников И.О. Особенности возникновения устойчивых колебаний тока большой амплитуды в длинных высокоомных планарно-эпитаксиальных структурах на основе арсенида галлия // Известия ВУЗов. Радиоэлектроника. 2015. Т. 58, № 4. С. 59-64.
6. Муравский Б.С. Электрофизические и фотоэлектрические свойства транзисторных структур с распределенным эмиттером и функциональные приборы на их основе / Б.С. Муравский, Г.П. Рубцов, Л.Р. Григорьян, О.Н. Куликов // Журнал радиоэлектроники: электронный журнал. 2000. № 10. [Сайт] URL: <http://jre.cplire.ru/jre/oct00/2/text.html> (дата обращения: 30.03.2018).
7. Михайлов А.И., Митин А.В., Кожевников И.О. Функциональный однокристалльный преобразователь свет-частота на основе высокоомного n-GaAs // Физика волновых процессов и радиотехнические системы. 2014. Т. 17. № 4. С. 64-69.

***А.И. Михайлов, С.А. Сергеев***

Саратовский национальный исследовательский  
государственный университет имени Н.Г. Чернышевского

### **ВОЛНОВЫЕ ПРОЦЕССЫ В ТВЕРДЫХ ТЕЛАХ И ИХ ИСПОЛЬЗОВАНИЕ В ЭЛЕКТРОНИКЕ**

В представленной статье рассмотрены проблемы применения волновых процессов различной природы в твердых телах в электронных приборах СВЧ и КВЧ диапазона. Авторами проанализированы возможности использования данной тематики в учебном процессе.

**Ключевые слова:** волны пространственного заряда, динамические неоднородности, функциональная микроэлектроника

Одним из важных направлений в современной физике является исследование колебательных и волновых процессов в твердых телах. Развитие радиолокации, средств связи и других областей требует постоянного роста рабочих частот и продвижения их в область сверхвысоких (СВЧ) и крайне высоких (КВЧ) частот полупроводниковых приборов и устройств. Конструирование таких устройств имеет тенденцию к уменьшению их габаритов и приспособлению к технологическим приемам интегральной микроэлектроники. Последнее в наибольшей степени относится к приборам средней и малой мощности, в то время как для приборов большой мощности основное внимание уделяется энергетическим проблемам: электрической прочности, отводу тепла и т.д. Габариты и особенности конструкции приборов обуславливаются в большей степени их резонансными или волноведущими системами, форма и размеры которых определяются длиной волны и типом колебаний, используемых в системе. До некоторого времени это были колебания электромагнитного поля. В современных электронных приборах СВЧ и КВЧ могут быть использованы не только электромагнитные волны, но также и волны носителей заряда в твердотельной плазме, акустические волны, спиновые волны, волны поляризации в сегнетоэлектрике и т.д.

Волновые принципы различной природы перспективны для применения в СВЧ микроэлектронике. Устройства, использующие динамические неоднородности волновой природы, обладают рядом преимуществ: имеют хорошую электрическую развязку между входом и выходом; хорошо совместимы с распределенными параметрами линий передачи; многофункциональны; наличие достаточно протяженного участка распространения волн (воздействие на полезный сигнал в процессе распространения более эффективно); аналоговая обработка информации; имеют малую длину волны, что позволяет существенно уменьшить размеры структур; возможность усиления сигнала внутренними свойствами электронной подсистемы.

В ФГБОУ ВО «Саратовский национальный исследовательский

государственный университет имени Н.Г. Чернышевского» в последние десятилетия активно изучаются волновые процессы различной природы в твердых телах и структурах на их основе. Интерес к исследованиям подобного рода связан с фундаментальными проблемами науки в целом и твердотельной электроники в частности, а также имеет прикладное значение. Понимание особенностей волновых процессов дает возможность построения адекватных математических моделей для их изучения и открывает перспективы для создания новых и совершенствования известных устройств СВЧ и КВЧ диапазонов. Авторы большое внимание в своих работах уделяют функциональным возможностям распространения и параметрического взаимодействия волн пространственного заряда (ВПЗ) в тонкопленочных полупроводниковых структурах (ТПС) с отрицательной дифференциальной проводимостью (ОДП) [1-5]. Этой тематикой ежегодно активно занимаются студенты в рамках курсовых работ и дипломных проектов. На кафедре физики полупроводников уже в течение многих лет работает научный кружок студентов и аспирантов «Волновые и колебательные процессы в полупроводниках и полупроводниковых структурах с отрицательной дифференциальной проводимостью» (научный руководитель проф. Михайлов А.И.). Также колебательным и волновым процессам в твердых телах уделяется внимание при подготовке бакалавров, магистров и аспирантов факультета нано- и биомедицинских технологий Саратовского государственного университета имени Н.Г. Чернышевского в процессе изучения следующих дисциплин: Введение в специальность, Твердотельная электроника, Основы математического моделирования в твердотельной электронике (направление подготовки 11.03.04); Твердотельная электроника и микроэлектроника (22.03.01, 12.03.04), Приборы на квантовых эффектах: технология и материалы (22.04.01), Полупроводниковая волновая электроника, Твердотельная и вакуумная СВЧ микроэлектроника, Современные проблемы электроники, Математические модели в естествознании и технике (11.04.04), Современные проблемы твердотельной электроники (11.06.01) и др. [6,7].

Результаты теоретических и экспериментальных исследований процессов возбуждения, распространения и параметрического взаимодействия волн пространственного заряда в полупроводниковых структурах с ОДП, полученные в ходе работы, использованы при написании и подготовке к защите докторской (Михайлов А.И.) и кандидатской (Сергеев С.А.) диссертаций.

*Список использованной литературы*

1. Сергеев С. А., Михайлов А. И., Сергеева Б. В. Эффективность спектрального преобразования при параметрическом взаимодействии волн пространственного заряда в полупроводниках с отрицательной дифференциальной проводимостью // В мире научных открытий. 2010. № 4, Часть 6. С. 49-52.
2. Фильтрация сигналов в устройствах на волнах пространственного заряда в полупроводниках / А. И. Михайлов, С. А. Сергеев, А. А. Горячев, И. В. Митин // Электродин. и техн. СВЧ и КВЧ. 1999. Т. 7, № 3 (24). С. 101-102.
3. Михайлов А. И., Сергеев С. А. Анализ параметрического взаимодействия волн пространственного заряда в асимметричных тонкопленочных полупроводниковых структурах с отрицательной дифференциальной проводимостью. Ч.1. Формулировка модели // Физика волновых процессов и радиотехнические системы. 2010. Т. 13, № 2. С. 102-107.
4. Михайлов А. И., Сергеев С. А. Анализ параметрического взаимодействия волн пространственного заряда в асимметричных тонкопленочных полупроводниковых структурах с отрицательной дифференциальной проводимостью. Ч.2. Результаты моделирования // Физика волновых процессов и радиотехнические системы. 2010. Т. 13, № 4. С. 70-74.
5. Михайлов А. И., Сергеев С. А. Функциональные возможности распространения и параметрического взаимодействия волн пространственного заряда в тонкопленочных полупроводниковых структурах n-GaAs и n-InP в миллиметровом диапазоне // Перспективные направления развития электронного приборостроения. Материалы конф. Саратов, «Контакт», 2003. С. 252-256.
6. Михайлов А. И., Сергеев С. А. Физические основы твердотельной электроники: Учеб. пособие. Саратов: Изд-во Сарат. ун-та, 2007. 164 с.
7. Михайлов А. И., Сергеев С. А., Глуховской Е. Г. Физические основы твердотельной электроники и микроэлектроники. Планы семинарских занятий: Учеб. пособие. / Под общ. ред. проф. А.И. Михайлова. Саратов: ООО «Редакция журнала «Промышленность Поволжья», 2008. 116 с.

***В.Ф. Названов***

Саратовский национальный исследовательский государственный университет  
имени Н.Г. Чернышевского

**ПОВЕРХНОСТНЫЕ ЭКСИТОН – ПОЛЯРИТОНЫ С БОЛЬШОЙ  
ДЛИНОЙ РАСПРОСТРАНЕНИЯ В ТОНКИХ ПЛЕНКАХ ДВУОКСИ  
ВАНАДИЯ**

В представленной статье изложены результаты компьютерного



моделирования оптического возбуждения симметричных мод поверхностных плазмонов –поляритонов (экситон-поляритонов) с большой длиной распространения (пробега), поддерживаемых тонкими слоями двуокиси ванадия.

Моделирование проведено для слоистых систем диэлектрик – двуокись ванадия – диэлектрик с призмной связью для случаев до и после фазового перехода изолятор – металл в двуокиси ванадия в видимой и инфракрасной областях частот.

Большая величина мнимой части диэлектрической проницаемости окисла ванадия после такого фазового перехода в инфракрасной области спектра дает возможность возбуждению мод поверхностных экситон-поляритонов, аналогичных поверхностным плазмонам – поляритонам в металлах (например, в Ag, Au, Cu и др.)

**Ключевые слова:** фазовый переход в слоях двуокиси ванадия, поверхностные плазмоны, поверхностные экситон – поляритоны с большой длиной распространения.

## LONG- RANGE SURFACE EXCITON POLARITONS IN THIN FILMS OF VANADIUM DIOXIDE

We present the computer simulation results of optical excitation of long- range surface polariton symmetric modes supported by thin layers of vanadium dioxide.

These modes have been studied for dielectric - vanadium oxide– dielectric layer systems with prism coupling before and after the insulator – to – metal phase transition in vanadium dioxide at visible and infrared frequencies.

Large imaginary part of dielectric constant of vanadium dioxide after this phase transition at infrared frequencies allows the excitation of surface polariton modes similar to long-range surface plasmon - polaritons on metals (for example, Ag, Au, Cu).

Results of computer simulation of reflectivity coefficient for p - polarized radiation as a function of angle of incidence in the prism for system with vanadium dioxide layer in metal state at the wavelength of 1060 nm, 1150 nm and 3400 nm confirm the fundamental proposition that a thin layer that has a dielectric constant with large imaginary component is capable of supporting a long- range coupled surface mode.

Введение.

Двуокись ванадия обладает обратимым фазовым переходом (ФП) полупроводник – металл, при котором происходит значительное изменение его оптических констант (коэффициентов преломления и диэлектрической проницаемости [1-4] (см. Таблицы 1 и 2 при разных длинах волн оптического диапазона).

ТАБЛИЦА 1. Показатели преломления и поглощения двуокиси ванадия до и после фазового перехода полупроводник - металл.

Длина волны, мкм	Показатель преломления до ФП	Показатель поглощения до ФП	Показатель преломления после ФП	Показатель поглощения после ФП
0.6328	2.85	0.35	2.40	0.48
1.06	3.1	0.5	1.7	1.8
1.15	3.2	0.5	1.7	1.8
1.55	3.26	0.17	1.7	2.5
3.4	3.1	0.002	4	6
10.6	2.55	0.08	8	9

ТАБЛИЦА 2. Диэлектрическая проницаемость двуокиси ванадия до и после фазового перехода полупроводник – металл.

Длина волны, мкм	Диэлектрическая постоянная до ФП		Диэлектрическая постоянная после ФП	
	Реальная часть	Мнимая часть	Реальная часть	Мнимая часть
0.6328	8	1.995	5.53	2.304
1.06	9.36	3.1	- 0.35	6.12
1.15	9.99	3.2	0	5.78
1.55	10.599	1.108	- 3.36	8.5
3.4	9.61	0.012	- 20	48
10.6	6.496	0.48	- 17	144

Вследствие своих уникальных свойств двуокись ванадия в виде поликристаллических пленок используется в визуализаторах инфракрасного (ИК) излучения, реверсивных голографических средах, модуляторах излучения, переключателях и ограничителях ИК излучения.

На наш взгляд, представляется весьма актуальным исследование оптических свойств пленок двуокиси ванадия в слоистых структурах с поверхностными плазмонами с целью расширения возможностей управления излучением подобными устройствами. При этом следует особо отметить, что ФП в двуокиси ванадия может быть инициирован за сотни фемтосекунд в результате оптического возбуждения (при энергии фотонов, превышающей энергию запрещенной зоны двуокиси ванадия) [3,4].

Как известно, моды поверхностных плазмон-поляритонов изучаются в

системах диэлектрик – металл – диэлектрик как при призмной связи, так и при использовании дифракционной решетки [5,6]. При этом имеют в виду, что для поддержания мод поверхностных плазмонов - поляритонов с большой длиной распространения необходим тонкий слой с большим отрицательным значением реальной части диэлектрической постоянной (металл - к примеру, Ag, Au и др. ).

Однако, в работе [7] авторами показано, что моды с большой длиной распространения могут существовать также в тонком слое материала, имеющего диэлектрическую постоянную с большим значением мнимой части. Авторы эти моды назвали поверхностными экситон – поляритонами с большой длиной распространения (LRSEP). Подобные моды исследовались разными авторами при использовании тонких слоев V, Cr, Fe, Ni, Pt, Pd, a-Si и других материалов. Краткий анализ работ по затронутой теме проведен в работе[6].

По нашему мнению, для изучения поверхностных экситон – поляритонов с большой длиной распространения (LRSEP) весьма перспективны тонкие слои двуокиси ванадия, в особенности слои после фазового перехода (см. таблицы 1 и 2), в частности, при длинах волн излучения 1,06 мкм, 1,15 мкм, 3,4 мкм и 10,6 мкм.

Результаты компьютерного моделирования спектров отражения слоистых структур диэлектрик – слой двуокиси ванадия – диэлектрик.

В работе было проведено компьютерное моделирование зависимостей коэффициента отражения оптического излучения с длиной волны 1.15 мкм слоистых структур двуокись кремния – двуокись ванадия – двуокись кремния от угла падения излучения. Получены зависимости этих структур с пленками двуокиси ванадия как после фазового перехода (ФП) в пленках (см. рис. 1), так и до ФП.

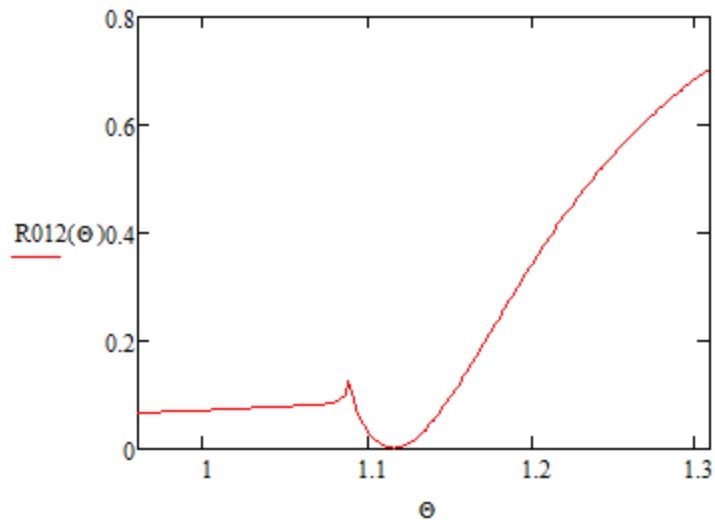


Рис. 1. Зависимость коэффициента отражения структуры, содержащей слой двуокиси ванадия после ФП, при длине волны излучения 1.15 мкм

Расчеты проводились с помощью пакета программ MathCad-14 при использовании метода матриц рассеяния для слоистых структур [ 5].

Как можно видеть из рис. 1, в такой структуре слой двуокиси ванадия после ФП обеспечивают возбуждение мод поверхностных экситон – поляритонов с большой длиной распространения (при призмном возбуждении излучением 1,15 мкм). Однако в структурах с пленками двуокиси ванадия до фазового перехода поверхностные экситон – поляритоны не проявляются.

Схожие результаты получены также и при других длинах волн оптического излучения (в частности, при 3,4мкм).

#### Заключение

Результаты компьютерного моделирования коэффициента отражения р-поляризованного излучения (с использованием пакета программ MathCad) в зависимости от угла падения излучения (в призме) для системы со слоем двуокиси ванадия в металлическом состоянии (фазе) при длинах волн излучения 1,15 мкм и 3,4 мкм подтверждают утверждение о том, что тонкий слой материала, имеющий диэлектрическую константу с большой величиной мнимой составляющей, способен поддерживать моду поверхностных экситон - поляритонов с большой длиной распространения.

Список использованной литературы:

1. Бугаев А.А., Захарченя Б.П., Чудновский Ф.А. Фазовый переход металл – полупроводник и его применение.- Л.: Наука, Ленинградское отделение. 1979.183 с.
2. Case F.C. Improved VO<sub>2</sub> thin films for infrared switching. // Applied Optics. 1991. Vol. 30. No 28.P. 4119 – 4123.
3. Cavalleri A. et all. Femtosecond Structural Dynamics in VO<sub>2</sub> during an Ultrafast Solid-Solid Phase Transition. // Physical Review Letters. 2001. Vol. 87. No 23. P. 23401-1 -23401-4.
4. Михеева О.П., Сидоров А.И. Поглощение и рассеяние инфракрасного излучения наночастицами двуокиси ванадия с металлической оболочкой. // ЖТФ. 2003ю Том 73. Вып. 5. С. 79 -83.
5. Названов В.Ф. Наноплазмоника в наносенсорике и нанофотонике: учебное пособие.- Саратов: изд-во ООО «Новый ветер». 2015. 88 с.

*А.Г. Роках*

Саратовский национальный исследовательский государственный университет имени Н.Г. Чернышевского

**ИССЛЕДОВАНИЕ ФОТОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ И РАДИАЦИОННЫХ  
ЯВЛЕНИЙ В ПОЛУПРОВОДНИКАХ В САРАТОВСКОМ  
УНИВЕРСИТЕТЕ**

Описана история исследования фотоэлектрических и радиационных явлений в полупроводниках, развивавшегося, начиная с 1958 г на кафедре физики твёрдого тела, а с 1981 г. – на кафедре физики полупроводников СГУ. К основным результатам можно отнести 1) получение аналитического вида дифференциальных потерь энергии ускоренных электронов и катодопроводимости; 2) теоретическое и экспериментальное описание фотоиндуктивного эффекта и его связи с фотоёмкостным; 3) теоретическое и экспериментальное описание аномального экранирования электрического поля в квазимонополярном фотопроводнике, имеющего широкие технические применения; 4) разработка технологии фотопроводящих сублимированных плёнок типа CdS-PbS, имеющих высокую стойкость к деградации, в частности к радиации; 5) открытие, экспериментальное и теоретическое исследование поверхностного фотоёмкостного эффекта (S-эффекта); 6) открытие и предварительное исследование вторично-ионного фотоэффекта, заключающегося в управлении светом выходом вторичных ионов в вакуум и рождение нового научно-технического направления – оптоионики. Все перечисленные научно-технические результаты в момент их появления не имели адекватных аналогов в мировой научно-технической литературе.

**Ключевые слова.** Фотопроводящие плёнки типа CdS и CdS-PbS, дифференциальные потери энергии электронов, фотоёмкостный и фотоиндуктивный эффекты, аномальное экранирование электрического поля, поверхностный фотоёмкостный эффект, вторично-ионный фотоэффект.

После окончания университета (по кафедре физики твердого тела) я начал работать в созданной к тому времени в СГУ по постановлению правительства СССР Проблемной лаборатории полупроводников, возглавляемой Зинаидой Ивановной Кирьяшкиной, ученицей В.П. Жузе, сподвижника патриарха советской физики академика А.Ф. Иоффе. Под руководством В.П. Жузе я выполнил дипломную работу в Ленинградском Институте полупроводников АН СССР.

В числе важнейших тем, порученных Проблемной лаборатории полупроводников, была работа (которая шла по постановлению Совета Министров СССР) по т.н. проблеме В-8, посвященная взаимодействию полупроводников с ионизирующими излучениями. В то время нам еще не было известно, что постановка этой проблемы была связана с готовящимся полетом человека в космос. В этой работе мне была поручена роль ответственного исполнителя (1958 г.).

В рамках работы над Проблемой В-8 исследовалось взаимодействие электронов малых и средних энергий, рентгеновского излучения и света с полупроводниковыми пленками CdS и ZnO. В работе принимали участие А.М. Свердлова, Н.М. Цукерман и В.А. Носова-Григорьева (которая получила первые сублимированные фотопроводящие пленки сульфида кадмия). Такого же уровня работа имела шифр Г-8 и была связана с выращиванием монокристаллов полупроводников (в основном Ge). Ответственным исполнителем работы была Н.В. Жимская, которая впоследствии стала заниматься охлаждаемыми примесными фотоприемниками инфракрасного излучения на германии. Выращивать монокристаллы ей помогал В.А. Маслов. По Проблеме В-8 основные результаты (конец 50-х – начало 60-х гг.) следующие.

1) Получена корреляция катодопроводимости (электронно-наведенной проводимости) для электронов средних энергий с фотопроводимостью. Впоследствии это направление было развито в диссертационной работе В.А. Смоляра 1970 г., в которой были получены аналитический вид

дифференциальных потерь энергии электронов в зависимости от энергии и глубины проникновения в мишень. Аналогичная зарубежная работа Спенсера представляла собой таблицу (не имела аналитического вида) и, тем не менее, была опубликована в бюллетене Национального бюро стандартов США. Аналитический вид дифференциальных потерь был использован для описания катодопроводимости в хорошем согласии с экспериментом. Эти результаты мирового уровня оригинальности не утратили своего значения до наших дней.

2) Изучена особенность катодопроводимости пленок ZnO, заключающаяся в практически необратимом изменении в вакууме (росте) проводимости под действием электронной бомбардировки пленок ZnO. В то время это явление связывалось нами с поверхностными изменениями электропроводности. Это направление было развито впоследствии А.М. Свердловой и созданной ею группой поверхностных явлений в полупроводниках и легло в основу ее кандидатской диссертации (1966 г.), а в более широком аспекте – и докторской (1988 г.).

В развитие вышеназванных исследований была создана технология сублимированных фотопроводящих пленок типа CdS и получено закрытое авторское свидетельство, как утверждали сотрудники Института полупроводников АН Украины, первое в стране (авторы З.И. Кирьяшкина и А.Г. Роках). По радиационным и фотоэлектрическим исследованиям этих пленок мною была защищена закрытая кандидатская диссертация в 1964 г. Защита прошла в СГУ в один день с Б.Н. Климовым.

После доклада в Киевском институте полупроводников (ведущая организация) диссертации Рокаха А.Г. и предоставления его сотрудникам экспериментальных образцов фотопроводящими сублимированными пленками типа CdS начали широко заниматься на Украине (Киев, Ужгород, Одесса и др.). Сотрудники Института полупроводников неоднократно приезжали в Саратов перенимать опыт, а профессор В.Б. Сандомирский из ИРЭ АН СССР на одной из Всесоюзных конференций назвал нас «пионерами» фотопроводящих пленок (типа CdS) в СССР.

В нашем университете работа по фотопроводящим пленкам типа CdS, в том числе обладающим эффектом фотопамяти, была продолжена В.Ф. Названовым, и в 1968 г. защищена кандидатская диссертация, а также впоследствии и докторская.

Важнейший технологический результат 60-х гг. – создание многоэлементных фоторезисторов на пленках типа CdS. Важнейший научный результат – разработка теоретических основ и модельных представлений о взаимодействии электронов средних энергий с полупроводниками и теоретическое описание продольной и поперечной катодопроводимости с учетом влияния контактов. Результаты по взаимодействию монополярных полупроводников с ускоренными электронами оказываются полезными и теперь для интерпретации результатов исследований на сканирующем электронном микроскопе.

В 1970 - 1980-х гг. продолжались экспериментальные исследования продольной фотопроводимости и фотоемкостного эффекта в квазимонополярных фотопроводниках. Был обнаружен и экспериментально исследован отрицательный фотоемкостный (фотоиндуктивный) эффект. Эта работа имела мировую новизну.

Параллельно, совместно с Л.И. Барановым выполнялись теоретические исследования неоднородной фотопроводимости и фотоиндуктивного эффекта (кандидатская диссертация В.Н. Алимпиева, 1972 г.), а также продольной фотопроводимости, фотоёмкостного и фотоиндуктивного эффектов при неоднородном возбуждении (кандидатская диссертация В.П. Малкова, 1975 г.). Так В.П. Малковым получен простой критерий, позволяющий определить, будет ли эффект ёмкостным или индуктивным в полупроводниковой структуре с заданным координатным распределением концентрации, который высоко оценил В.Б. Сандомирский, известный своим строгим подходом к теоретическим результатам, в отзыве на диссертацию В.П. Малкова.

Связь оптических и фотоэлектрических процессов в пленках типа CdS была изучена в работе Н.Б. Кац-Трофимовой (1976 г.). Она нашла ряд



корреляций оптических свойств пленок типа CdS с фотоэлектрическими, в том числе продольной фотопроводимости. Для исследования продольной фотопроводимости и фотоёмкостного эффекта была, в продолжение работ Московского энергетического института (кафедра К.В. Шалимовой) развита технология получения пленок в квазизамкнутом объеме (метод «горячей стенки», технолог Л.П. Матасова). Работу В.А. Смоляра по взаимодействию полупроводников с ускоренными электронами продолжила Е.А. Новикова.

В 70-е годы было проведено исследование электрофизических и фотоэлектрических свойств пленочных гетеропереходов CdS-CdTe Н.М. Цукерман и написана кандидатская диссертация, защитить которую она не успела.

Часть выполненных исследований вошла в коллективную монографию «Фотопроводящие пленки (типа CdS) под редакцией З.И.Кирияшкиной и А.Г. Рокаха, вышедшую в 1979 г. в изд. СГУ, а также в учебное пособие А.Г. Рокаха «Фотоэлектрические явления в полупроводниках и диэлектриках».

Совместно с Л.И. Барановым, В.Б. Гаманюком и М.В. Юдовичем было дано теоретическое объяснение известному из литературы по тонкопленочным транзисторам и экспериментально наблюдавшемуся нами эффекту аномального экранирования электрического поля в квазимонополярном полупроводнике. Следствием этой работы стало понимание такого парадоксального, на первый взгляд, факта, что тонкопленочные транзисторы из поликристаллических и аморфных полупроводников, без которых не обходится ни один жидкокристаллический дисплей, работают в режиме обогащения канала основными носителями, а не обеднения, как в случае монокристаллических кремниевых полевых транзисторов.

80-е годы были посвящены исследованию фото- и катодопроводимости нового класса пленок  $A^2B^6-A^4B^6$  (технолог Н.В. Елагина). Эти пленки (CdS-PbS) обладали высокой стойкостью к деградации, в частности к радиации, выдерживая дозу до  $10^9$  рад, как показали наши исследования при облучении электронами и исследования с гамма облучением, выполненные в НПО

«Орион» (г. Москва). Результаты перечисленных выше работ, включая 20 авторских свидетельств на изобретения были оформлены в виде докторской диссертации А.Г. Рокаха, защищенной в 1985 г. в Кишиневе.

Кроме того, изучалась пленочная структура фотопроводник-термохромный слой (на основе окисла ванадия) по предложению члена-корреспондента АН СССР Б.П. Захарчени и проф. Ф.А. Чудновского из ЛФТИ АН СССР. По этой тематике была защищена кандидатская диссертация В.А. Кузнецовым в 1987 г. также в Кишиневе, поскольку в Саратове не было в то время диссертационного совета по физике полупроводников.

Исследования структурных и фотоэлектрических свойств пленок CdS-PbS продолжались в 1990-е и 2000-е гг. На этих пленках был обнаружен поверхностный фотоемкостный эффект (S-эффект), исследованию которого была посвящена кандидатская диссертация С.В. Стецюры (1999 г.). Теоретическим аспектам быстродействия и стойкости к деградации этих пленок посвящена кандидатская диссертация В.Э. Бухарова (2003 г.)

В 2000-е гг. проводилось изучение открытого в СГУ на пленках CdS-PbS совместно с А.Г. Жуковым явления, получившего название вторично-ионный фотоэффект [. Своеобразие этого физического эффекта заключалось, во-первых, в том, что в отличие от остальных фотоэлектрических явлений, он был не электронным, а ионным, с выходом в вакуум вторичных ионов при освещении. Во-вторых, выход вторичных положительных ионов свинца при освещении белым светом увеличивался, а ионов кадмия – уменьшался. По этой тематике прошли защиты трех кандидатских диссертаций: А.А. Сердобинцев - 2006 г., Матасов - 2013 г., М.И. Шишкин - 2016 г., а также диссертаций С.А. Климовой и И.В. Маляра, выполненных под руководством С.В. Стецюры.

Работы в упомянутом направлении имеют мировую новизну. Это было подтверждено избранием А.Г. Рокаха в 2010 г. членом редколлегии международного журнала «Physics Express», а также номинатором награды этого журнала за лучшую статью года по физике полупроводников «Prof. A.G. Rokakh Award».

Работы по исследованию ВИФЭ проводились по трем грантам РФФИ. В последнем из этих грантов с участием Н.Д. Жукова исследуется электронная и ионная эмиссия из квантовых точек, а также возможность превращения плазменного резонанса в средней инфракрасной области спектра из оптического явления в фотоэлектрическое. Эта возможность в случае положительного ответа могла бы быть использована в инфракрасном приборостроении.

Всего по указанной тематике, выполнявшейся на кафедре физики твердого тела и физики полупроводников СГУ, получено 43 авторских свидетельства и патента на изобретения, опубликована 1 монография, 3 учебных пособия и десятки статей, в том числе и в международных журналах, из которых приведена лишь часть. Здесь почти не охвачены исследования, проведенные в указанном направлении под руководством С.В. Стецюры и А.А. Сердобинцева, выполненные в XXI столетии на кафедре материаловедения и управления качеством, частично вошедшие в монографию. Так вкратце выглядит история одного из направлений физики полупроводников, заложенной В.П. Жузе и З.И. Кирьяшкиной в Саратовском университете.

*Работа поддержана грантами РФФИ 16-07-00226 и 16-08-00524.*

*Список использованной литературы*

1. Свердлова А.М., Роках А.Г. Влияние облучения электронами средних энергий на проводимость пленок полупроводников // Известия АН СССР. Сер. физ. – 1964. – Т. 28, № 9. – С. 1514-1515.
2. Rokakh A.G., Smolyar V.A. ON THE DEPENDENCE OF THE TRANSVERSE CATHODE CONDUCTIVITY ON THE ENERGY OF BOMBARDING ELECTRONS // Український фізичний журнал. 1969. Т. 14. С. 1217.
3. Роках А.Г., Смоляр В.А. Распределение потерь энергии в сернистом кадмии // Известия АН СССР. Сер. физ. – 1969. – Т. 33, № 3. – С. 473-475.
4. Баранов Л.И., Малков В.П., Роках А.Г. О комплексной проводимости неоднородных квазиоднополярных полупроводников // Радиотехника и электроника. – 1978. – Т. 23, № 1. – С. 145-149.
5. Роках А.Г. Варизонная модель полупроводника стойкого к деградации // Письма в ЖТФ. – 1984. – Т. 10, вып. 13. – С.820-824.
6. Жуков Н.Д., Шишкин М.И., Роках А.Г. Плазменное отражение в мультислойном слое узкозонных полупроводников // Письма в ЖТФ. - 2018, вып.8. - С. 102-110.
7. Роках А.Г., Биленко Д.И., Шишкин М.И., Скапцов А.А., Вениг С.Б., Матасов М.Д. // ФТП. - 2014. - Т. 48, вып. 12. - С. 1602–1606.

## **ТЕХНОЛОГИЯ ПОЛУЧЕНИЯ МИКРОЧАСТИЦ КАРБОНАТА КАЛЬЦИЯ, МОДИФИЦИРОВАННЫХ НАНОЧАСТИЦАМИ МАГНЕТИТА, НА НЕОРГАНИЧЕСКИХ ВОЛОКНАХ**

В представленной статье приведены два метода получения микрочастиц карбоната кальция, модифицированных наночастицами магнетита, на неорганических волокнах поликапролактона.

**Ключевые слова.** Нановолокна, микрочастицы карбоната кальция, наночастицы магнетита, синтез.

В настоящее время актуальным направлением исследований является разработка и создание неорганических матриц с целью их применения в медицине. Проведено большое количество исследований по встраиванию наночастиц магнетита ( $\text{Fe}_3\text{O}_4$ ) в микрочастицы карбоната кальция ( $\text{CaCO}_3$ ) с целью использования их в качестве транспорта для адресной доставки лекарств и других соединений [1-6]. В последние годы растет интерес к разработке неорганических микро- и нановолокон, которые уже используются в медицине, и сфера их применения расширяется. Примером такого применения являются микроволокна с осевшими на них ядрами  $\text{CaCO}_3$ , позволяющие более эффективно лечить травмы костных тканей.

Наночастицы магнетита необходимого размера могут быть встроены в пористую структуру микрочастиц карбоната кальция диаметром  $1 \div 6$  мкм [1-6], что позволяет значительно увеличить сорбционную способность наночастиц магнетита, сохраняя при этом их магнитные свойства. Полученные микрочастицы карбоната кальция поддаются управлению магнитным полем, что достаточно важно при использовании их в медицине.

В данной работе на основе поливинилового спирта (поликапролактама) с помощью метода электроформования были получены микроволокна поликапролактона (ПКЛ). На основе приведенного в работе [7] метода были проведены опыты по получению покрытия из микрокапсул карбоната кальция на неорганических волокнах ПКЛ. В ходе опытов были определены следующие

закономерности:

1) Оптимальным временем синтеза микрочастиц карбоната кальция сферической модификации ватерит в ультразвуковой ванне является временной интервал от 30 секунд до 1 минуты. Больше время синтеза микрочастиц карбоната кальция приводит к образованию кубических микрочастиц модификации кальцит.

2) На размер и стабильность микрочастиц карбоната кальция сферической модификации ватерит влияет концентрация используемых растворов солей хлорида кальция и карбоната натрия. Уменьшение концентрации ведет к увеличению среднего размера образованных частиц карбоната кальция. При этом более стабильно образуются частицы модификации ватерит.

В ходе работы были разработаны две методики модификации микрочастиц карбоната кальция, выращенных на неорганических волокнах ПКЛ, наночастицами магнетита. Первая методика заключается в предварительном смешивании растворов солей карбоната натрия и хлорида кальция с раствором  $Fe_3O_4$  и ультразвуковой обработке в их смеси волокон поликапролактона. Вторая методика заключается в том, что волокна поликапролактона подвергаются ультразвуковой обработке в растворе  $Fe_3O_4$ , а затем в систему добавляются растворы солей карбоната натрия и хлорида кальция (рис. 1).

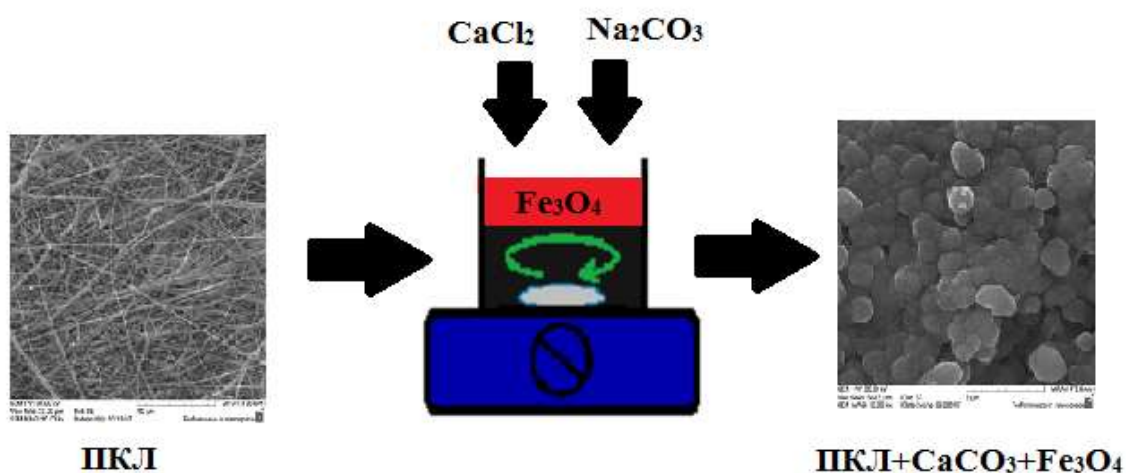


Рис. 1

На рис. 2 приведены СЭМ изображения полимерных волокон, покрытых пористым  $CaCO_3$ , полученных первым методом. Использовалась растровая

электронная микроскопия (аналитический комплекс на базе растрового электронного микроскопа высокого разрешения Mira\LMU фирмы «TESCAN»), широко применяемая для визуализации объектов микро- и наномасштабов.

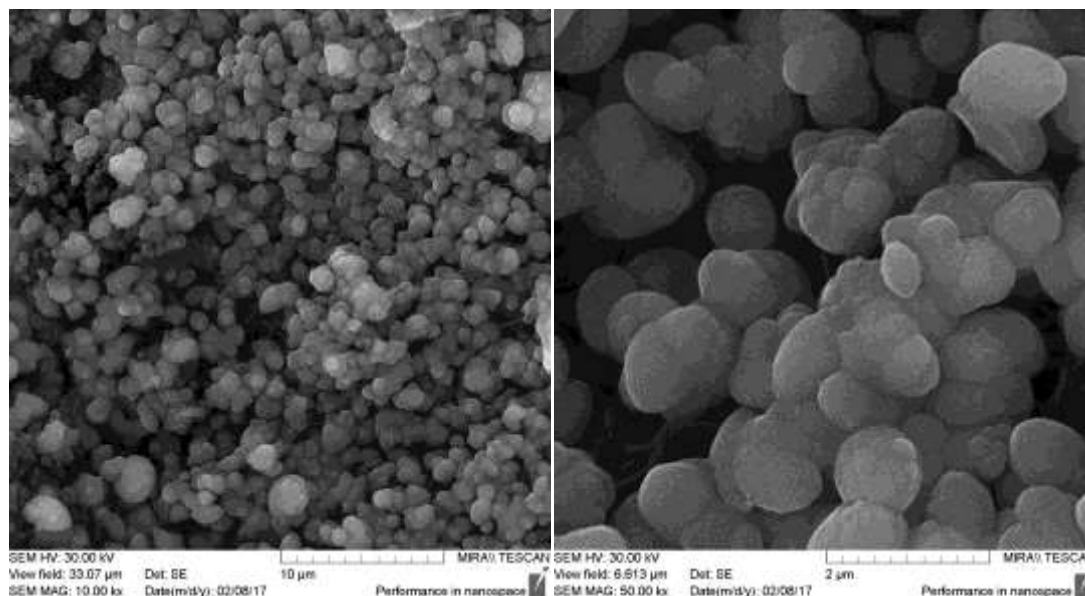


Рис. 2

Измерение размеров микрочастиц и волокон в материале было проведено с использованием полученных СЭМ изображений и программного обеспечения ImageJ. Анализу подвергалось 100 частиц и 100 волокон в каждом образце. Видно, что поверхность волокон равномерно покрывается частицами карбоната кальция модификации ватерит. Все полученные образцы волокон обладают магнитными свойствами.

Показано, что каждая из разработанных технологий получения имеет свои преимущества и недостатки и в зависимости от предполагаемого применения нановолокон должна выбираться наиболее эффективная методика производства.

Технологиям получения и исследованиям свойств nano- и микрочастиц различной природы уделяется внимание при подготовке бакалавров, магистров и аспирантов факультета nano- и биомедицинских технологий Саратовского государственного университета имени Н.Г. Чернышевского в процессе изучения следующих дисциплин: Основы молекулярной электроники, Физика и

химия границ раздела фаз и коллоидных систем, Физико-химические основы технологии электроники и нанoeлектроники (направление подготовки 11.03.04); Физика и химия коллоидов и границ раздела фаз (11.04.04); Физика и химия поверхности и коллоидов, Материаловедение и технологии современных и перспективных материалов (22.04.01); Интеллектуальные материалы для капсулирования и доставки лекарств, Физико-химические основы капсулирования и создания нанокомпозитов, Полимерные материалы и композиты на их основе, Методы моделирования и оптимизации свойств нетканых материалов (22.04.01) и др.. Данной тематикой активно занимаются студенты в рамках подготовки курсовых работ и дипломных проектов. На кафедре физики полупроводников несколько лет работает научный кружок студентов и аспирантов «Коллоиды наноразмерных объектов: синтез, исследование свойств, перспективы применения» (научный руководитель доцент Сергеев С.А.).

*Список использованной литературы*

1. Composite magnetite and protein containing CaCO<sub>3</sub> crystals. External manipulation and vaterite→ calcite recrystallization-mediated release performance / A. Sergeeva, R. Sergeev, E. Lengert et al. // ACS applied materials & interfaces, 2015. Vol. 7, № 38. P. 21315-21325.
2. Сергеева А. С., Сергеев Р. С., Сергеев С. А. Исследование процесса перекристаллизации магнитных микрочастиц // Фундаментальные и прикладные аспекты новых высокоэффективных материалов: Мат. науч. конф. Казань: ИП Синяев Д.Н., 2013. С. 142-144.
3. Формирование и исследование сферических пористых микрочастиц карбоната кальция, обладающих магнитными свойствами / Р. С. Сергеев, А. С. Сергеева, Е. В. Ленгерт и др. // Наноматериалы и нанотехнологии: проблемы и перспективы: сб. матер. конф. Москва: Прондо. 2014. С. 275-283.
4. Vaterite→calcite recrystallization of magnetic calcium carbonate microparticles / R. Sergeev, E. Lengert, A. Sergeeva et al. // The nanoparticles and nanostructured coatings microcontainers: technology, properties and applications. Mater. Int. Conf., RF – Print. Saratov: Saratov State University, 2015. P. 72.
5. Формирование и исследование сферических пористых микрочастиц карбоната кальция, функционализированных магнитными наночастицами / Р. С. Сергеев, А. С. Сергеева, Е. В. Ленгерт и др. // Новые материалы и технологии: состояние вопроса и перспективы развития: сб. матер. конф. Саратов: «ИЦ «Наука», 2014. С. 244-249.
6. Сергеев С. А., Гулманов Э. Э., Сергеев Р. С. Исследование свойств водотопливных эмульсий с наночастицами магнетита на сверхвысоких частотах // В мире научных открытий. 2014. № 4(52). С. 148-160.
7. Синтез и исследование свойств микрочастиц CaCO<sub>3</sub>, выращенных на неорганических волокнах и модифицированных наночастицами Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> / Н.В. Короневский, Р.С. Сергеев, М.С. Савельева, С.А. Сергеев // «Методы компьютерной диагностики в биологии и медицине - 2017»: Мат. Всерос. семинара / Саратов: Изд-во Саратовский источник, 2017. – С. 120-123.

## **НОВЫЕ ФУНКЦИОНАЛЬНЫЕ МАТЕРИАЛЫ ДЛЯ УСТРОЙСТВ НА ВОЛНАХ ПРОСТРАНСТВЕННОГО ЗАРЯДА**

В статье проведен анализ данных по нитридам галлия, индия и алюминия в сравнении с арсенидом галлия с позиций оценки перспектив их использования для создания устройств на волнах пространственного заряда.

**Ключевые слова:** функциональная электроника, нитриды, волны пространственного заряда, отрицательная дифференциальная проводимость.

Прогресс в развитии современных технологий обуславливает необходимость увеличения производства устройств нового назначения и более высокого уровня. Зачастую такие устройства требуют применения новых материалов, к которым могут применяться особые требования по функциональным, технологическим или экономическим соображениям. Причем использование таких материалов в уже широко известных приборах и устройствах может расширить области их применения.

Во многих ведущих научных организациях, в том числе и в ФГБОУ ВО «Саратовский национальный исследовательский государственный университет имени Н.Г. Чернышевского», проводятся экспериментальные и теоретические исследования новых функциональных материалов и структур.

Известно, что устройства на волнах пространственного заряда (ВПЗ) в полупроводниках с отрицательной дифференциальной проводимостью (ОДП) могут выполнять в СВЧ диапазоне такие радиотехнические функции как усиление, преобразование, генерация, задержка и изменение фазы сигналов и др. и являются перспективным классом функциональных микроэлектронных устройств СВЧ диапазона [1-7]. Большое количество научных работ посвящено поиску, изучению свойств и освоению новых полупроводниковых материалов, способных заменить традиционный в этом применении *n-GaAs*, что позволит повысить частотный предел работы данных устройств.

Перспективными материалами для электронной и оптоэлектронной



техники в течение примерно 20 лет рассматриваются структуры на основе полупроводниковых нитридов –  $GaN$ ,  $AlN$  и некоторые тройные соединения типа  $AlGaN$  и  $InGaN$ . Они могут использоваться в качестве активных сред в лазерных диодах и светодиодах в диапазоне коротких длин волн, на их основе можно получать структуры с барьерами Шоттки для приборов силовой электроники, а также изготавливать транзисторы, в том числе для СВЧ электроники. Богатый спектр свойств этих материалов, который при создании на их основе функциональных устройств обработки информационных сигналов в разных частотных диапазонах (от низких частот вплоть до видимой части спектра) может обеспечить последним широкие функциональные возможности, позволяет относить их к классу функциональных материалов.

Одним из перспективных направлений применения нитридов сегодня считается создание в сине-зеленой коротковолновой области видимого спектра и ближней ультрафиолетовой области ярких источников света – светодиодов, а также источников белого цвета на основе системы «кристалл-люминофор». Нобелевская премия по физике 2014 года была присуждена профессорам Исаму Акасаки и Хироси Амано (Япония) и Шуджи Накамура (США) именно за разработку ярких синих светодиодов на основе гетероструктур  $GaN$  и его твердых растворов, а также светодиодов белого свечения.

Структуры на основе  $GaN$  перспективны также для разработки компонентной базы силовой и СВЧ электроники – диодов Шоттки и транзисторов. Транзисторы на основе  $GaN$ -гетероструктур находят применение в передающих СВЧ устройствах, что обусловлено рядом преимуществ широкозонных структур на базе  $GaN$  перед структурами на основе узкозонных полупроводниковых материалов. Высокая удельная мощность транзисторов на базе  $GaN$  позволяет существенно упростить топологию мощных интегральных схем, повысить их эффективность, уменьшить массу и улучшить габаритные параметры. В последние несколько лет получены результаты в развитии технологий на  $GaN$ , что привело к освоению мощных СВЧ транзисторов, монолитных интегральных схем в промышленном производстве.

Гетероструктуры на основе  $GaN$  и его твердые растворы могут применяться для формирования слоев с различным составом и свойствами, что довольно перспективно для конструирования и оптимизации под конкретные задачи. Все это делает их весьма привлекательными с точки зрения применения в качестве активного слоя устройств функциональной электроники.

В данной работе проведен анализ параметров и характеристик нитридов с позиций оценки перспектив их использования в функциональных устройствах на ВПЗ.

Зависимость дрейфовой скорости электронов от напряженности электрического поля, или  $v(E)$  зависимость, является важнейшей характеристикой соединений типа  $A_3B_5$ . Знание зависимости  $v(E)$  крайне важно при прогнозировании перспектив каждого конкретного соединения: по ней определяются энергетические возможности генераторов и усилителей (мощности, пороговые напряжения, КПД), анализируются физические процессы в структурах, определяются граничные возможности приборов.

На рис. 1 изображена типичная для соединений  $A_3B_5$  зависимость  $v(E)$ : здесь  $E_{пор}$  – пороговое поле эффекта Ганна,  $v_{max}$  и  $v_{min}$  – максимальное и минимальное значения дрейфовой скорости электронов,  $\mu_d = dv/dE$  – дифференциальная подвижность электронов.

Для применения конкретного полупроводникового материала в устройствах на ВПЗ необходим эффективный переход электронов с энергетических уровней центральной долины на энергетические уровни боковых долин. Для этого должны выполняться следующие условия: плотности эффективных состояний в боковых долинах должны быть больше, чем в центральной (что обычно хорошо выполняется); подвижность носителей в боковых долинах д.б. намного меньше, чем в центральной; скорость междолинных переходов достаточно высока; разделяющий центральную и боковые долины интервал энергий меньше ширины запрещенной зоны полупроводника (в этом случае не возникают дополнительно концентрационные эффекты – ударная ионизация и др.); указанный интервал

должен быть больше 0,1 эВ (иначе заселенность боковых долин становится существенной даже при комнатной температуре, что не приводит к образованию ОДП полупроводника). Также материал, как среда распространения волн, должен обладать следующими свойствами: быть однородным, иметь высокую подвижность носителей заряда, малую диэлектрическую проницаемость, а также обеспечивать термостабильную работу устройства.

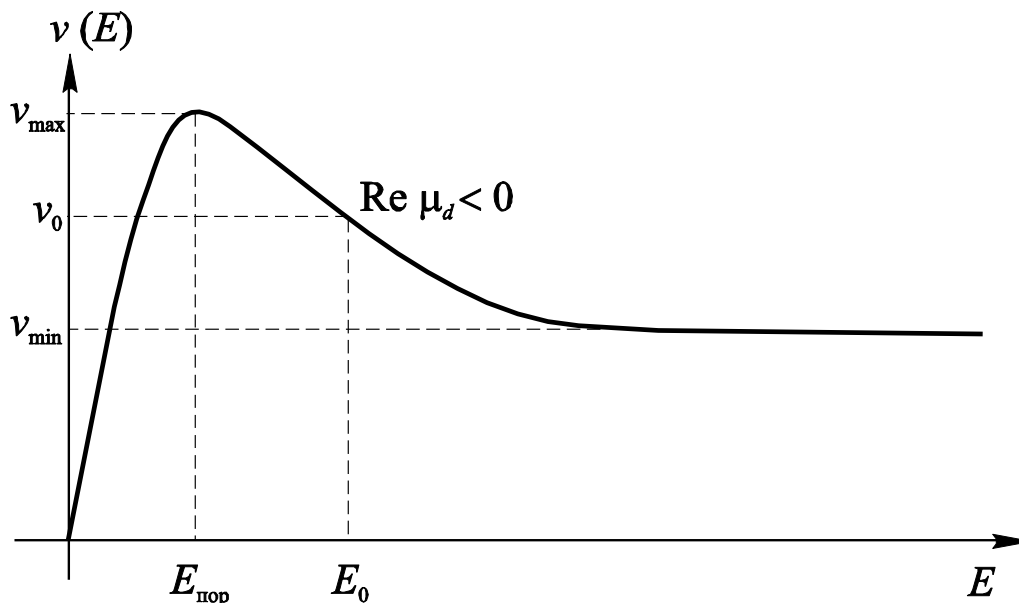


Рис. 1

Известно, что фазовая скорость ВПЗ  $v_{ph}$  близка к дрейфовой скорости электронов  $v_0$ . Для эффективного преобразования электромагнитного сигнала в ВПЗ и обратно может быть использован элемент связи с электродинамической системой, представляющий собой частотно-избирательную встречно-штыревую систему полосковых контактов с барьером Шоттки (ВШП). Пространственный шаг топологических элементов ВШП  $l_0$  должен быть равен длине волны  $l_0 = \lambda_0 = v_{ph} / f_0$ , где  $\lambda_0$  – длина ВПЗ на рабочей частоте;  $f_0$  – рабочая частота. Чем выше рабочая частота (т.е. меньше длина волны при заданной скорости), тем меньший шаг имеют элементы топологии. Верхняя граница рабочих частот определяется технологическими возможностями достижения максимального разрешения при изготовлении устройств. Таким образом, с точки зрения повышения рабочих частот предпочтительнее материалы с большими значениями скоростей. С другой стороны, линейные размеры устройств также

связаны с длиной волны и на практике составляют величину порядка нескольких длин волн самой низкочастотной спектральной составляющей. С этой точки зрения целесообразно выбирать материалы с небольшой скоростью распространения. Таким образом, для каждого конкретного применения необходимо подбирать материал с определенным значением дрейфовой скорости электронов.

Диффузия электронов приводит к размытию ВПЗ, спаду коэффициента нарастания ВПЗ в области высоких частот и к уменьшению верхнего частотного предела усиления ВПЗ. По этому критерию предпочтительны материалы с малыми значениями коэффициента диффузии.

Большое значение величины порогового поля ведет к росту потребления энергии и, следовательно, к разогреву структуры. Поэтому материалы для устройств на ВПЗ должны обладать хорошей теплопроводностью. Чем выше величина модуля отрицательной дифференциальной подвижности электронов, тем эффективнее будут проявляться различные свойства ВПЗ при их распространении и взаимодействии.

Остановимся подробнее на анализе параметров нитридов галлия, алюминия и индия и арсенида галлия.

Ограничение верхнего частотного предела приборов на ВПЗ происходит из-за конечного времени релаксации отрицательной дифференциальной проводимости ( $\tau_{NDR}$ ), равного сумме времени релаксации энергии электронов в центральной долине ( $\tau_E$ ) и времени набора и потери электронами энергии, равной междолинному зазору  $\Gamma$ -L ( $\tau_\Delta$ ). Величины временных констант  $\tau_{NDR}$ ,  $\tau_E$  и  $\tau_\Delta$  у *GaN* меньше, чем у *GaAs* [6-7]. Это позволяет надеяться, что рабочие частоты для *GaN* будут выше, чем для *GaAs*.

По таким параметрам, как коэффициент диффузии, дрейфовая скорость насыщения (остается высокой при высоких температурах) электронов и диэлектрическая проницаемость *GaN* и *InN* имеют очевидное превосходство над *AlN*, который в свою очередь превосходит аналогичные параметры *GaAs*.

Большим недостатком нитридов для их применения в устройствах является

высокое пороговое поле, приводящее к сильному разогреву полупроводника вследствие высокого потребления энергии в тонких активных слоях.

Теплопроводность у *GaN* и *AlN* выше, чем у остальных соединений, поле пробоя нитридов выше почти на порядок, что, несомненно, является достоинством при разработке мощных приборов. Повышенная теплопроводность *GaN* и *AlN* обеспечивает работоспособность приборов вплоть до 700 К. Большая эффективная масса электронов у *GaN* и *AlN* обеспечивает меньшую вероятность рассеяния при повышенных температурах.

Условие электрической устойчивости позволяет применять более толстые структуры соединений *GaN*, *InN* и *AlN* по сравнению с *GaAs*. Также можно отметить высокую устойчивость нитридов к воздействию агрессивных сред и радиационному излучению. Все это является несомненными преимуществами нитридов.

Таким образом, проведенный сравнительный анализ основных свойств соединений  $A_3B_5$  показал, что *GaN*, *AlN* и *InN* являются перспективными материалами для применения в устройствах на ВПЗ в полупроводниках и имеют несомненные преимущества по сравнению с *GaAs*.

Необходимо отметить, что технологии получения и работы с новыми полупроводниковыми соединениями постоянно совершенствуются. И вполне возможно появление в ближайшее время новых сведений об уже хорошо известных или еще недостаточно изученных материалах с хорошими перспективами использования в приборах на волнах пространственного заряда.

#### Список использованной литературы

1. Сергеев С. А., Михайлов А. И., Сергеева Б. В. Эффективность спектрального преобразования при параметрическом взаимодействии волн пространственного заряда в полупроводниках с отрицательной дифференциальной проводимостью // В мире научных открытий. 2010. № 4, Часть 6. С. 49-52.
2. А. И. Михайлов, С. А. Сергеев, А. А. Горячев, И. В. Митин Фильтрация сигналов в устройствах на волнах пространственного заряда в полупроводниках// Электродинам. и техн. СВЧ и КВЧ. 1999. Т. 7, № 3 (24). С. 101-102.
3. Михайлов А. И., Сергеев С. А. Анализ параметрического взаимодействия волн пространственного заряда в асимметричных тонкопленочных полупроводниковых структурах с отрицательной дифференциальной проводимостью. Ч.1. Формулировка модели // Физика волновых процессов и радиотехнические системы. 2010. Т. 13, № 2. С. 102-107.
4. Михайлов А. И., Сергеев С. А. Анализ параметрического взаимодействия волн

пространственного заряда в асимметричных тонкопленочных полупроводниковых структурах с отрицательной дифференциальной проводимостью. Ч.2. Результаты моделирования // Физика волновых процессов и радиотехнические системы. 2010. Т. 13, № 4. С. 70-74.

5. Михайлов А. И., Сергеев С. А. Функциональные возможности распространения и параметрического взаимодействия волн пространственного заряда в тонкопленочных полупроводниковых структурах n-GaAs и n-InP в миллиметровом диапазоне // Перспективные направления развития электронного приборостроения. Материалы конф. Саратов, «Контакт», 2003. С. 252-256.

6. Сергеев С. А., Михайлов А. И., Сергеева Б. В. Перспективные материалы для функциональных устройств на волнах пространственного заряда // Полупроводниковая электроника и молекулярные нанотехнологии: Сб. статей / Под ред. проф. А. И. Михайлова. Саратов: ИЦ «Наука», 2013. С. 154-170.

7. Перспективы применения нитридов галлия, индия и алюминия для функциональных устройств на волнах пространственного заряда / С. А. Сергеев, А. И. Михайлов, Б. В. Сергеева // Ученые Записки Физического Факультета Московского Университета. 2014. № 2 (10). С. 7-11.

**В.В. Тихонов**

Саратовский национальный исследовательский государственный университет  
имени Н.Г. Чернышевского

## **СПИН-ВОЛНОВЫЕ ВОЗБУЖДЕНИЯ В ПЛЕНОЧНЫХ СТРУКТУРАХ ЖЕЛЕЗОИТТРИЕВЫХ ГРАНАТОВ**

В монокристаллических ферритовых средах могут возбуждаться два типа спиновых волн – дипольные и обменные. Дипольные спиновые волны, в литературе их чаще называют магнитостатическими волнами (МСВ), распространяются за счет дальнедействующего диполь-дипольного взаимодействия. Обменные спиновые волны (ОСВ) распространяются за счет короткодействующего обменного взаимодействия. Наиболее сильное обменное взаимодействие формирует в кристалле упорядоченную структуру спиновых моментов, которая проявляется в виде спонтанной намагниченности феррита. При континуальном подходе оба типа спиновых волн представляются одинаково – в виде волн прецессии вектора намагниченности, и различаются только длинами. Волны с длинами  $\lambda \leq 1$  мкм принято считать обменными, а с длинами  $\lambda \geq 10$  мкм – дипольными.

В настоящее время наиболее широкое применение нашли магнитостатические волны. Это произошло благодаря простоте их возбуждения микрополосковыми преобразователями. Обменные волны до недавнего времени оставались практически не освоенными, хотя их существование было предсказано Блохом гораздо раньше, еще в 1930 году. Трудность использования ОСВ состояла в том, что для их возбуждения требовалась недостижимо высокая локализации СВЧ магнитных полей.

Косвенное подтверждение существования ОСВ было получено при обнаружении спин-волновых резонансов (СВР), которые первоначально наблюдались в тонких пермалоевых пленках. Впоследствии те же резонансы были обнаружены в пленках железоиттриевого граната (ЖИГ) на частотах возбуждения гибридных дипольно-обменных волн. При этом наблюдались резонансы достаточно высоких порядков, с номерами от 10 до 100, что указывало на достаточно слабое затухание ОСВ. Однако эти резонансы возбуждались не во всех пленках ЖИГ, а только в тех, которые имели «закрепленные» спины на поверхности.

Понятие «закрепления» спинов было введено Киттелем [1] для теоретического описания эффекта СВР. Оно выражалось в виде граничного условия на поверхности феррита  $\dot{m}|_s = 0$ , где  $\dot{m}$  - вектор прецессии спонтанной намагниченности. Однако несколько раньше было получено другое граничное условие  $\partial \dot{m} / \partial n|_s = 0$ , где  $\dot{n}$  - нормаль к поверхности пленки. Это условие описывало «свободное» состояние поверхностных спинов. Согласно теории Киттеля, резонансы ОСВ могли возбуждаться только при полном или при частичном закреплении спинов. При этом ожидаемая эффективность преобразования ОСВ была очень мала, порядка 0,1%. К тому же, сам механизм закрепления спинов оставался не до конца выясненным. Согласно гипотезе Киттеля закрепление могло быть вызвано скачком анизотропии на поверхности феррита. Для этого толщина слоя должна была быть много меньше длин ОСВ, порядка 1нм, что сравнимо с толщиной молекулярного слоя кристалла. В этом случае применение макроскопической теории оказывалось

под вопросом, поскольку в столь тонких слоях понятие усредненной намагниченности теряло смысл. Если же предположить, что поверхностный слой имел конечную толщину, сравнимую с длиной ОСВ, то это означало бы, что он мог обладать и собственными резонансными свойствами. В действительности так и оказалось.

Подтверждение этого было получено в экспериментах с имплантированными пленками ЖИГ [2]. Собственные резонансы ОСВ наблюдались при нормальном намагничивании пленки вне спектра возбуждения МСВ. В тех же пленках при касательном намагничивании наблюдалось импульсное возбуждение бегущих ОСВ [3]. Волны распространялись вглубь чистой пленки ЖИГ и отражались от ее противоположной поверхности. При этом наблюдалась серия задержанных эхо-импульсов, по спаду амплитуд которых рассчитывалась эффективность преобразования ОСВ. Было установлено, что в имплантированных пленках эффективность преобразования ОСВ может достигать 80% и более.

Столь высокая эффективность преобразования ОСВ входила в явное противоречие с теорией Киттеля. Поэтому в работах [4,5] был предложен механизм черенковского излучения ОСВ, который имел место на частотах фазового синхронизма вытекающих обменных волн и волноводных мод ОСВ, возбуждаемых в тонком легированном слое пленки ЖИГ быстрыми типами волн – электромагнитными и/или магнитостатическими. При этом эффективность преобразования ОСВ могла достигать практически 100%.

В данной работе этот результат получил экспериментальное подтверждение. В качестве толщиной неоднородности пленки ЖИГ использовался тонкий переходный слой на границе пленка-подложка. Экспериментальный образец пленки ЖИГ был изготовлен в виде дискового резонатора, который возбуждался микрополосковым преобразователем, как показано на вставке рис.1. Эксперименты проводились при нормальном намагничивании пленки ЖИГ.

В непрерывном режиме измерялись амплитудно-полевые характеристики



(АПХ) отраженного сигнала пленочного резонатора. На вход макета подавался СВЧ сигнал на фиксированной частоте. Намагничивающее поле изменялось по линейному закону. Результаты измерения АПХ представлены на рис.1.

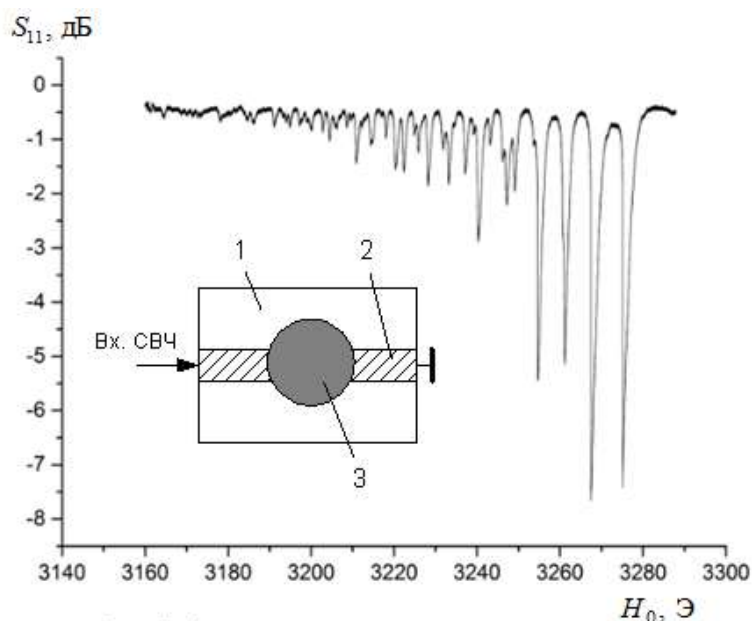


Рис.1. Амплитудно-фазовая характеристика отраженного сигнала пленочного ЖИГ резонатора. На вставке - экспериментальный макет резонатора: 1 - диэлектрическая подложка; 2- микрополосковая линия; 3 - пленочный резонатор

В импульсном режиме на вход экспериментального макета подавался радиоимпульс длительностью 20нс с частотой заполнения 3ГГц. Напряженность намагничивающего поля выбиралась равной значению поля наблюдения одного из наиболее интенсивных пиков на рис.1. Наблюдалась серия отраженных эхоимпульсов ОСВ, как показано на рис.2. Относительная задержка соседних эхоимпульсов составляла примерно 50нс. Задержка последнего эхоимпульса составляла 0.5мкс. Учитывая, что толщина пленки составляла 13 мкм, нетрудно было посчитать групповую скорость ОСВ. В нашем случае она составляла примерно  $v_g \approx 5,2 \cdot 10^4$  см/с.



Рис.2. Осциллограмма отраженных эхоимпульсов ОСВ

Заметим, что это на порядок меньше скорости звука. По спаду амплитуд эхоимпульсов были сделаны оценки эффективности преобразования ОСВ  $k \approx 70\%$  и декремента  $q'' \approx 220 \text{ см}^{-1}$ . С учетом измеренной групповой скорости нетрудно было рассчитать временные декременты ОСВ. Для нашего случая они составляли  $\omega'' \approx 12 \text{ дБ/мкс}$ .

Таким образом, была показана возможность использования переходного слоя на границе пленка-подложка для высокоэффективного возбуждения обменных спиновых волн. Обнаруженный эффект может применяться для диагностики структуры пленок ЖИГ и для создания нового типа сверхминиатюрных спинволновых устройств.

#### Список использованной литературы

1. Kittel C. Interaction of Spin Waves and Ultrasonic Waves in Ferromagnetic Crystals // Phys. Rev. 1958, [Vol.110], №6, - P.1295-1299.
2. Тихонов В.В., Толкачев А.В., Остафийчук Б.К. Наблюдение резонансов обменных спиновых волн в имплантированном слое пленки ЖИГ // Письма в ЖТФ. 1991, Том 17. №15. С.49-52.
3. Тихонов В.В., Толкачев А.В. Линейное возбуждение обменных спиновых волн в имплантированных пленках ЖИГ // ФТТ. 1994. Том 36. №1. С.185-193.
4. Тихонов В.В., Нефедов И.С. Преобразование обменных спиновых волн в слоистой ферритовой структуре. // ЖТФ. 1996. Том 66. №8. С.133-142.
5. Тихонов В.В., Литвиненко А.Н. Резонансный механизм возбуждения обменных спиновых волн в двухслойной феррит-ферритовой структуре // Известия РАН. Сер. физическая. 2014. Том 78. №2. С.191-196.

## МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ

*С.Б. Вениз, Р.К. Чернова, В.Г. Сержантов, О.Г. Шаповал,  
В.П. Сплюхин, Е.И. Селифонова, Г.Н. Наумова, Н.Н. Щербакова*

Саратовский национальный исследовательский государственный  
университет имени Н.Г. Чернышевского

### БАКТЕРИЦИДНЫЕ СВОЙСТВА НЕКОТОРЫХ КОМПОЗИТОВ НА ОСНОВЕ ГЛАУКОНИТА

В настоящей работе проведено исследование сорбционной активности природного сорбента (глауконита) к тетрациклину (ТЦ), доксициклину (ДЦ), цетилпиридинию хлориду (ЦПХ); получены композиты с иммобилизованными биологически активными веществами и изучено их антибактериальное действие по отношению к *Staphylococcus aureus* и *Escherichia coli*.

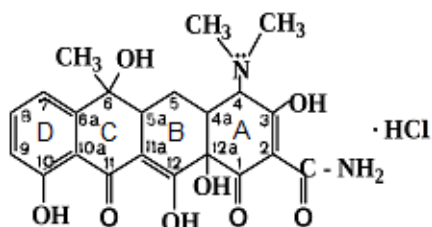
**Ключевые слова:** глауконит, сорбция, *Staphylococcus aureus*, *Escherichia coli*, цетилпиридиния хлорид, доксициклин, тетрациклин, антибактериальный композит.

**Введение.** В современной медицине все больше возрастает интерес к сорбентам различного происхождения, как простому, доступному, нетравматичному методу эфферентной терапии [1]. Различные отравления, инфекционные заболевания, эндотоксикозы, кожные заболевания, такие как псориаз, красный лишай и др., аллергическая настроенность организма, накопление в организме избыточного количества различных метаболитов (креатинина, мочевины и др.) имеют показания для применения сорбентов. Создание комбинированных энтеросорбентов является перспективным направлением в лечении эндогенной интоксикации, при которой, в организме происходит накопление как среднемолекулярных, так и низкомолекулярных токсичных метаболитов с различными физико-химическими свойствами. За счет синергизма действия сорбционных композитов с различными веществам и различными механизмами сорбции можно добиться усиления суммарного положительного лечебного эффекта.

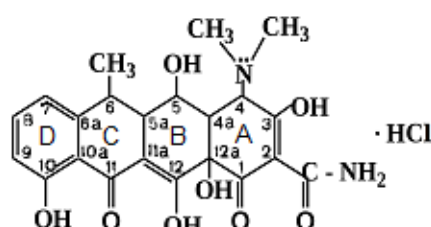
Глауконит – это натуральный природный алюмосиликат, обладающий рядом универсальных полезных свойств (ионообменные, буферные и

сорбционные), которые можно успешно использовать в различных сферах жизнедеятельности. С помощью глауконита достигается высокая продуктивность без использования пестицидов, регуляторов роста, синтетических кормовых добавок, антибиотиков и других химических препаратов. У глауконита выявлено специфическое влияние на микроорганизмы рубца, желудка и кишечника, снижение процессов брожения и гниения в кишечнике, регуляция состава и концентрации электролитов пищеварительного тракта, а через них - минерального обмена и кислотно-щелочного состояния в организме.

Тетрациклин и доксициклин являются антибиотиками группы тетрациклинов, которые характеризуются обширным противомикробным спектром действия: подавляют размножение большинства грамположительных и грамотрицательных бактерий. Антибактериальный эффект этих препаратов основан на подавлении синтеза белка на уровне бактериальной рибосомы. Тетрациклин и доксициклин отличаются в положении лишь одной гидроксильной группы и имеют одинаковую молекулярную массу ( $M_r(C_{22}H_{24}N_2O_8)=444,4$  г/моль):

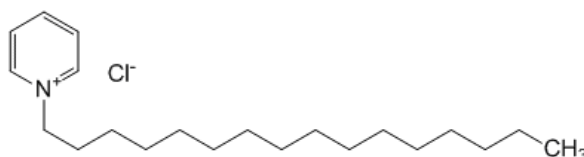


*Тетрациклина гидрохлорид*



*Доксициклина гидрохлорид*

Цетилпиридиния хлорид (ЦПХ) является универсальным антисептическим средством, имеет следующую структурную формулу:



Он эффективен в отношении грамположительных и грамотрицательных бактерий, а также некоторых вирусов и грибов. Благодаря значительной увлажняющей способности и незначительному поверхностному натяжению, цетилпиридиния хлорид хорошо проникает в глубокие слои слизистой

оболочки, где оказывает бактерицидное действие. ЦПХ действует как поверхностно-активный катион (положительно заряженный ион) и благодаря эмульгационным свойствам деполяризует мембрану микроорганизмов, увеличивая ее проницаемость, и приводит, таким образом, к лизису бактериальной или грибковой клетки.

**Материалы и методы.** В качестве матрицы для получения композитов использовали обогащённую фракцию глауконита, полученную из глауконитового песка Белоозёрского месторождения методом сухой магнитной сепарации. Содержание глауконита в исследуемом образце составило 85 %. Морфологические характеристики глауконита изучали на сканирующем электронном микроскопе (СЭМ) MIRA 2 LMU (Tescan, Чехия).

Биологически активными веществами композитов выступали антибактериальные препараты: тетрациклин, доксициклин и цетилпиридиния хлорид. Получение композитов глауконита с вышеуказанными веществами проводили методом сорбции в статическом режиме при комнатной температуре, который описан в работе [2].

Антибактериальную активность полученных композитов глауконита с иммобилизованными веществами исследовали на штаммах *Staphylococcus aureus* 109 P и *Escherichia coli* ATCC 25922. Проводили мерный высев бульонных культур штамма по 1 мл (105 КОЕ) на мясопептонный агар сразу и через 3, 6 часов после посева с последующим подсчётом выросших колоний. Для этого к навескам композита добавляли 100 мл стерильного мясопептонного бульона (МПБ), затем инокулировали по 1 мл взвеси чистых суточных культур указанного штамма, приготовленных по стандарту мутности ФГУН ГИСК им. Л.А. Тарасевича (ОП 0.75 при длине волны 600 нм) и разведённых физиологическим раствором до конечной концентрации 105 КОЕ/мл. В качестве контролей использованы посеvy вышеуказанных штаммов в мясопептонном бульоне. Весовые количества композитов были обусловлены необходимостью создания его субингибирующих концентраций исходя из допустимых значений минимальных ингибирующих концентраций этих

веществ для опытных штаммов. Все посеы повторяли трижды и инкубировали в термостате при 37 °С. Статистическую обработку результатов проводили, рассчитывая среднее арифметическое количество клеток в 1 мл и стандартное отклонение с последующим определением достоверности различий с контрольными посевами между средними величинами с вероятностью 95 %.

**Результаты и обсуждения.** В исследуемом образце глауконита обнаружены различные по форме и размеру зёрна. При большом увеличении установлена слоистая наноструктурная поверхность, образованная из чешуек различных размеров (от 100 до 1000 нм). Толщина чешуек варьируется от 10 до 100 нм, расстояние между чешуйками составило 100-500 нм (рис. 1).



Рис. 1. Электронные микрофотографии зерен обогащённого глауконита (Ув. а – 1000 раз, б – 50000)

Примеры изменения оптической плотности в растворах лекарственных веществ до и после сорбции глауконитом представлены на рис. 2. Остаточные концентрации исследуемых препаратов в растворе после сорбции определяли спектрофотометрически по предварительно построенным градуировочным графикам в координатах «оптическая плотность - концентрация». Степень извлечения исследуемых веществ глауконитом из растворов составила: для ТЦ - 77 %, ДЦ - 81 %, ЦПХ - 88 %.

Изучено влияние полученных композитов на динамику развития популяций штаммов *Staphylococcus aureus* в Lag и Log-фазе (табл.1, 2, 3). Lag-фаза – это фаза адаптации к питательной среде, она является основной и длится первые 3-4 часа после посева для использованных штаммов. Описание механизма сорбции глауконитом приведено в работах [3,4].

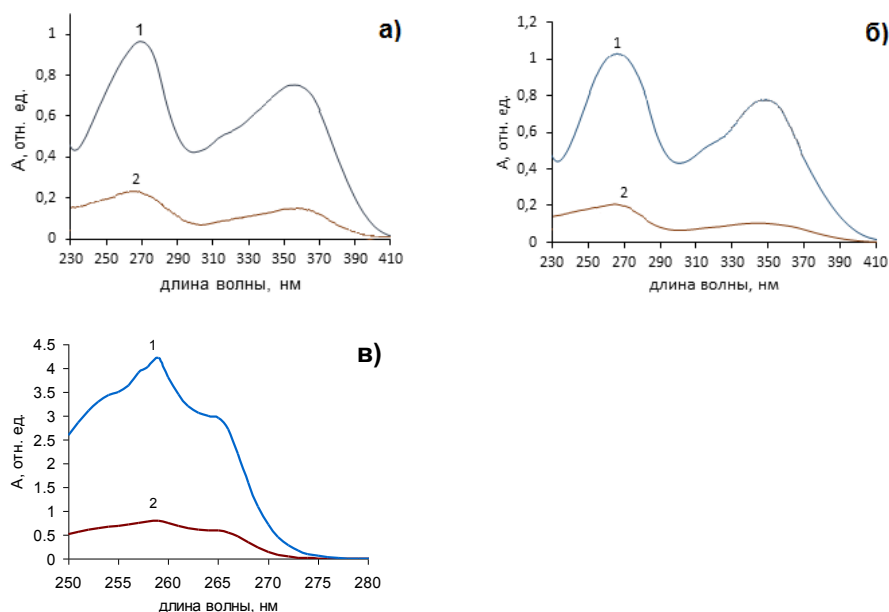


Рис. 2. Спектры поглощения растворов лекарственных веществ до (1) и после (2) сорбции обогащённым глауконитом: а) тетрациклина, б) доксициклина, в) цетилпиридиния хлорида

В эту фазу клетки не размножаются и не растут, эти процессы начинаются только в конце фазы. Известно, что антибиотики обычно в lag-фазу на бактерий не влияют. Log-фаза – это фаза логарифмического роста, она характеризуется интенсивным размножением бактерий в питательной среде, начинается через 4-5 часов после посева и продолжительность ее составляет в среднем 10 часов. В эту фазу на бактерии антибиотики оказывают максимальное воздействие, следовательно, интересно влияние на эту фазу и композита.

Таблица 1. Результаты антимикробного действия композита глауконита с доксициклином на клетки *Staphylococcus aureus* и *Escherichia coli*

Условия культивирования							
E.coli							
Время посева	Контроль	Глауконит (50 мг)	Глауконит (25мг)	ДЦ (8 мкг/мл)	ДЦ (4 мкг/мл)	Композит (0,5мг)	Композит (0,25мг)
0ч	540±200	720±230	710±50	480±160	690±80	460±120	620±290
3ч (Lag-фаза)	1330±130	1000±80	980±100	420±202	500±902	680±150	830±240
6ч (Log-фаза)	42200±14800	40900±6400	52300±15400	270±702	470±602	1035±170	1060±150
S.aureus							
Время посева	Контроль	Глауконит (50 мг)	Глауконит (25мг)	ДЦ (0,25 мкг/мл)	ДЦ (0,125 мкг/мл)	Композит (30 мг)	Композит (15 мг)
0ч	940±190	1050±100	980±120	960±70	990±80	980±160	1060±130
3ч (Lag-фаза)	1040±260	1270±180	970±110	740±150	820±130	990±170	1120±450
6ч (Log-фаза)	37300±1350	38700±1960	36400±2700	500±120	630±90	1660±210	2030±360

Таблица 2. Результаты антимикробного действия композита глауконита с тетрациклином на клетки *Staphylococcus aureus* и *Escherichia coli*

Условия культивирования							
E.coli							
Время высева	Контроль	Глауконит (50 мг)	Глауконит (25мг)	ТЦ (8 мкг/мл)	ТЦ (4 мкг/мл)	Композит (5мг)	Композит (2,5мг)
0ч	580±40	634±37	606±19	672±56	633±47	650±71	625±50
3ч (Lag-фаза)	1300±100	1500±400	1266±305	943±49	1533±379	1066±153	1100±200
6ч (Log-фаза)	42667±4726	39167±2055	40033±1060	38300±1082	41000±1572	40900±1609	40233±1301
S.aureus							
Время высева	Контроль	Глауконит (50 мг)	Глауконит (25мг)	ТЦ (4 мкг/мл)	ТЦ (2 мкг/мл)	Композит (50 мг)	Композит (25мг)
0ч	980±80	935±100	970±60	1110±180	970±60	940±50	960±40
3ч (Lag-фаза)	1230±70	1280±90	1490±170	930±262 <sup>2</sup>	810±150	1060±140	1260±270
6ч (Log-фаза)	48000±900	50000±1800	46800±2200	675±380 <sup>2</sup>	790±270	2760±250	3520±320

Таблица 3. Результаты антимикробного действия композита глауконита с цетилпиридинием хлоридом на клетки *Staphylococcus aureus* и *Escherichia coli*

Условия культивирования							
E.coli							
Время высева	Контроль	Глауконит (50 мг)	Глауконит (25мг)	ЦПХ (16 мкг/мл)	ЦПХ (8 мкг/мл)	Композит (62,5 мг)	Композит (30 мг)
0ч	425±30	660±37	545±30	482±54	538±45	498±36	455±40
3ч (Lag-фаза)	1050±110	1700±300	1085±295	543±49	333±38	396±114	380±125
6ч (Log-фаза)	45070±4552	41255±1900	38050±950	590±62	648±54	655±90	834±256
S.aureus							
Время высева	Контроль	Глауконит (50 мг)	Глауконит (25мг)	ЦПХ (20 мкг/мл)	ЦПХ (10 мкг/мл)	Композит (50 мг)	Композит (25мг)
0ч	850±70	935±100	970±60	930±80	970±60	1010±42	985±50
(Lag-фаза)	1320±60	1280±90	1490±170	530±262 <sup>2</sup>	610±150	766±125	880±135
(Log-фаза)	45420±13100	50000±1800	46800±2200	875±180 <sup>2</sup>	790±270	995±210	1036±240

Из табл.1 видно, что композит глауконита с ДЦ оказывает подавляющее действие в обоих навесках на штаммы *Staphylococcus aureus* и *Escherichia coli*. Имобилизованный ТЦ (табл. 2) оказывает подавляющее действие только на бактерии *Staphylococcus aureus*. Композит с ЦПХ (табл. 3) существенно подавляет рост обоих видов бактерий. Следует отметить, что сама глауконитовая матрица, не проявляет активности к исследуемым штаммам.

Полученные результаты могут быть использованы для усовершенствования имеющихся сорбентов и для создания новых антибактериальных энтеросорбентов. Представляет интерес дальнейшее



исследование бактерицидных свойств композитов глауконита с различными иммобилизованными агентами на других штаммах микроорганизмов и оценка перспектив их применения в медицине, ветеринарии и сельском хозяйстве.

*Список использованной литературы*

1. Лужников Е.А. Детоксикационная терапия. СПб. 2000. 192 с
2. Venig S.B., Chernova R.K., Sergeantov V.G., Selifonov A.A., Shapoval O.G., Nechaeva O.V., Splyukhin V.P., Zakharevich A.M., Selifonova E.I., Naumova G.N., Scherbakova N.N. Synthesis of glauconite composites and study of their antibacterial activity // Journal of biomedical photonics & engineering. 2016. Vol 2, № 4. P. 1-5.
3. Наумова Г.Н., Селифонова Е.И., Чернова Р.К., Вениг С.Б., Сержантов В.Г., Захаревич А.М. О кинетике и механизме сорбции тетрациклина глауконитом // Сорбционные и хроматографические процессы. 2017. Т. 17, № 1. С. 141-147.
4. Наумова Г.Н., Вениг С.Б., Чернова Р.К., Сержантов В.Г., Селифонова Е.И., Сплюхин В.П. Сорбция некоторых лекарственных веществ Белоозёрским глауконитом // Сорбционные и хроматографические процессы. 2017. Т. 17. № 5. С. 716-724.
5. Soldatenko E.M., Doronin S.Yu., Chernova R.K., Venig S.B., Zaharevich A.M., Serzhantov, Shapoval O.G. Sorption and biocidal properties of the composite based on glauconite saratov region and copper nanoparticles // Бутлеровские сообщения. 2015. Т. 42. № 6. С. 1-6.

*С.А. Климова*

Саратовский национальный исследовательский государственный университет  
имени Н.Г. Чернышевского

## МИКРО- И НАНОСТРУКТУРНЫЕ МАТЕРИАЛЫ С ФУНКЦИОНАЛЬНЫМИ СВОЙСТВАМИ ДЛЯ ФОТОЭФФЕКТИВНЫХ УСТРОЙСТВ

В статье приводятся результаты фундаментальных работ по созданию микро- и наноструктурированных материалов с функциональными свойствами для фотоэффективных устройств. Результаты радиационной стабильности и электрической модификации фотопроводящей поликристаллической пленки сульфида кадмия и монокристаллической пластины кремния установлены путем создания на их поверхности ленгмюровских наноструктурированных слоев арахината свинца. Для увеличения количества наночастиц в ленгмюровском слое показано формирование тонких наноразмерных пленок на основе гибридных структур органической (полимерные щетки) и неорганической природы (наночастицы магнетита), разработанные в сотрудничестве с петербургским институтом высокомолекулярных соединений РАН.

**Ключевые слова:** поликристаллическая пленка сульфида кадмия, ленгмюровская пленка арахината свинца, наночастицы магнетита, полимерные щетки.

Развитие нанотехнологий, в том числе технологии Ленгмюра-Блоджетт (ЛБ), и все большее распространение наноразмерных пленочных электронных устройств делает особенно актуальным изучение поверхности фотопроводников и ее модификацию с целью формирования микро- и нанорельефа, влияющего на свойства электронной структуры в целом. При выборе способа формирования морфологии микрорельефа обычно исходят из его влияния на оптические и рекомбинационные параметры структуры, то есть на эффективность фотопреобразования.

Исследования, проводимые в течение ряда лет в Саратовском государственном университете, показали перспективность использования фотопроводящих структур на основе модельного объекта (сульфида кадмия) для микро- и нанoeлектроники и необходимость дальнейшего их изучения. В результате экспериментов, проводимых научной группой под руководством профессора Рокаха А.Г., а также Стецюра С.В., удалось добиться повышения радиационной стойкости сульфида кадмия созданием в объеме фотоприемника гетерофазных областей, обеспечивающих сток дефектов и электронных возбуждений в узкозонные фазы PbS. Введение таких фаз приводит к необходимости нахождения компромисса между фоточувствительностью и радиационной стойкостью материала. Возникает идея, что радиационная стойкость может быть повышена за счет ультратонкого покрытия, содержащего атомы свинца. В этом случае покрытие является не столько экранирующим, сколько создающим определенный потенциальный рельеф поверхности, способствующий стоку дефектов из фоточувствительного объема пленки в нефотоактивные области покрытия.

В работе [1] поликристаллическая полупроводниковая пленка сульфида кадмия (CdS) с легирующей добавкой  $\text{CuCl}_2$  в количестве до 0,1% весовых и толщиной 1  $\mu\text{m}$  получали методом термического испарения в вакууме на слюдяную или проводящую стеклянную подложку с собственной шероховатостью поверхности, не превышающей 8-12 нм. Затем поликристаллическая пленка подвергалась высокотемпературному отжигу в

муфельной печи при температуре  $550 \pm 5$  °С в течение 15 минут для получения гексогональной структуры зерен поликристаллической пленки.

Формирование и нанесение на фотопроводящую поликристаллическую пленку сульфида кадмия или монокристаллическую пластину кремния наноструктурированных слоев арахината свинца проводили с помощью технологии Ленгмюра-Блоджетт. Данная технология позволяет создавать органические покрытия различные по толщине, как (варьирую количество слоев нанесения) с механическими (плотность, сила химических связей между молекулами (варьируя кислотность водной субфазы)), так и электрическими свойствами (поверхностный потенциал, электростатический фазовый сдвиг) [2]. Изменение длины цепочки связи СН- в меньшую или большую сторону, может привести либо к излишней «жесткости» монослоя, не позволяющей формировать различные структуры при варьировании условий получения, либо к излишней растворимости пленки в воде. В качестве органического покрытия использована арахиновая кислота ( $C_{20}H_{40}O_2$ ) для получения более стабильного монослоя, а в качестве неорганической составляющей пленки – нитрат свинца с концентрацией 0.1, 1 и 10 ммоль/л, растворенной в водной субфазе. Монослой получали при следующих условиях: концентрация арахиновой кислоты составляет 1 ммоль/л, температура  $20,0 \pm 0,5$ °С и давление нанесения в 25 мН/м поддерживались постоянными в течение всего эксперимента. Для варьирования морфологии наноструктурированной ленгмюровской пленки экспериментально выбраны значения кислотности  $pH = 3,6$  и  $pH = 8,6$  водной субфазы, приводящие к существенным их изменениям – формирование дендритоподобных и кластерных образований свинцовых включений, соответственно [3].

Исследование локальных фотоэлектрических характеристик показало, что модификация поверхности сульфида кадмия ленгмюровским покрытием на основе арахината свинца, содержащим сформированные дендритные, либо кластерные свинцовосодержащие включения, полученные при разных pH, приводит к понижению фотоутомляемости (в 4-7 раз) и к увеличению

радиационной стойкости (в 8-10 раз) сульфида кадмия при облучении электронами допороговых энергий (до 5 кэВ) при наборе поглощенной дозы до  $10^{10}$  рад.

Параллельно данному исследованию проводился эксперимент для выявления закономерности влияния СВЧ плазменной микрообработки на электронные свойства поверхности кристаллов кремния (100) в условиях слабой адсорбции [4]. Актуальность переноса органического монослоя с включениями свинца на фотополупроводниковую подложку Si состоит в возможности получения сочетания таких свойств, как фоточувствительность и радиационная стойкость структуры. Показано, что за счет формирования встроенных поверхностных потенциалов, определяемых химической активностью используемых рабочих газов и режимами СВЧ плазменного воздействия, обеспечивается модификация электронных свойств поверхности монокристаллической пластины кремния для расширения электрофизических и функциональных свойств поверхности фотопроводниковых структур.

В случае нанокompозитных систем на основе молекулярных полимерных щеток с магнитными наночастицами условия получения, режимы и характер внешних воздействий существенно влияют на конформацию макромолекул, а, следовательно, и на толщину, шероховатость ленгмюровского покрытия в целом. Для их формирования на границе раздела вода/воздух часто используют электростатические взаимодействия между заряженными наночастицами, диспергированными в субфазе, и заряженными монослоями на поверхности воды. Ограничением выбора компонентов наноструктурированных слоев является стабильность монослоя и сложность оптимизации процесса их переноса вследствие влияния различных функциональных добавок на их фазовое поведение. В работе [5] для увеличения количества наночастиц в ленгмюровкой наноструктурированной пленки были использованы наночастицы магнетита, а в качестве матрицы - длинноцепочечные полимерные щетки с большим количеством коротких и длинных боковых цепочек. Полимерные щетки ПИ-*прив*-ПММА на основе регулярно привитых

сополимеров с полиимидной (ПИ) основной цепью и боковыми цепями полиметилметакрилата (ПММА) двух различных степеней полимеризации получены методом контролируемой радикальной полимеризации с переносом атома. Нестабилизированные гидрозоли магнетита получали методом химического со-осаждения с использованием растворов солей Fe(III) и Fe(II) в присутствии основания.

Нанокompозитные слои на основе полимерных щеток ПИ-*прив*-ПММА-63 и ПИ-*прив*-ПММА-114 с гидрофобными наночастицами магнетита диаметром около  $18 \pm 2$  нм формировали непосредственным смешением аликвоты раствора наночастиц магнетита и полимерных щеток (1 мг/мл) в различных соотношениях (1:2, 1:1 и 2:1), и вносили на поверхность водной субфазы для дальнейшего образования упорядоченного монослоя. Полученные монослои переносили на поверхность твердых подложек (слюда) при различных значениях поверхностного давления монослоя (0.5, 10 и 25 мН/м) методом Ленгмюра-Шеффера. Для выявления влияния поверхностного давления на морфологию перенесенных монослоев полимеров и композитов на их основе был использован метод атомно-силовой микроскопии.

Методом атомно-силовой микроскопии показал, что морфологии пленок полиимидных щеток определяется фазовым состоянием монослоя, которое, в свою очередь, зависит от поверхностного давления переносимого на поверхность слюды монослоя. С увеличением поверхностного давления монослоя происходит изменение морфологии от червеобразной к глобулярной структуре полимерных щеток. Для композитных пленок установлено, что при изменении поверхностного давления и концентрации наночастиц магнетита типичным для всех образцов является увеличение средней шероховатости поверхности пленки полимерных щеток, содержащих наночастицы магнетита, в 4-6 раз, в результате включения наночастиц магнетита в монослой полимерных щеток. Показано, что увеличение шероховатости поверхности с увеличением концентрации наночастиц магнетита более выражено для полиимидных щеток с большей длиной боковых цепей ПММА, обеспечивая более высокую

адсорбционную способность полимерного слоя для наночастиц.

Таким образом, создание тонкого наноструктурированного покрытия с помощью технологии Ленгмюра-Блоджетт со свинцовыми или магнитными нановключениями позволяет улучшать радиационную стабильность и фотопроводящие свойства полупроводниковых систем. Кроме того, применяя новые разработанные материалы, как полимерные щетки, позволяет создавать покрытия с контролируемой морфологией их поверхности и увеличению количества магнетита в пленке при использовании более разветвленной молекулярной щетки за счет большего количества боковых цепей.

Возможность технической реализации таких материалов для фотопроводящих элементов является перспективным направлением в решении проблем возобновляемой энергетики. Органическое покрытие может быть использовано как средство переноса металлических кластеров на поверхность полупроводниковых датчиков или других устройств для модификации их поверхности, изменения свойств структуры (оптических и электрофизических). Использование современных методов исследования поверхности позволяет не только определить микро- и нанорельеф поверхности, но и проследить динамику его изменения в процессе воздействия технологических и внешних факторов в процессе эксплуатации фотодатчика.

*Фундаментальные работы были выполнены при поддержке Российского научного фонда (проект № 14-13-00200) и Российского фонда фундаментальных исследований (проект № 10-12-02-31533-мол-а, №11-08-00529-а и № 8-08-00764-а; междисциплинарный проект №11-08-12058-офи-м-2011; российско-турецкий проект РФФИ/TUBITAK №10-08-91219-СТ\_а).*

*Список использованной литературы*

1. Stetsyura S. V., Malyar I. V., Serdobintsev A. A., Klimova S. A. Effect of parameters of narrow-gap inclusions on the type and intensity of secondary-ion photoeffect in heterophase photosensitive semiconductors // Semiconductors. 2009. Vol. 43. No. 8. pp. 1064–1070.
2. Klimova S. A., Sreij R., Bratashov D., Bookhold J., Teichert N., Gorobets A. S., Hellweg T. Pb arachidate Langmuir-Blodgett coatings of silicon wafers: relation between Pb particle density and subphase composition // Colloid and Polymer Science. 2018. Vol. 296. Is. 4. pp. 771-780.

3. Stetsyura S. V., Klimova S. A., Wenig S. B., Malyar I. V., Arslan M., Dincer I., Elerman Y. Preparation and probe analysis of Langmuir–Blodgett films with metal-containing dendritic and cluster structures // Applied Physics A. 2012. Vol. 109. pp. 571–578.
4. Yafarov R. K., Klimova S. A. Influence of microwave plasma microprocessing on the electronic properties of the (100) Si surface // Technical Physics. 2014. Vol. 59. Is. 3. pp. 411-415.
5. Klimova S. A., Inozemtseva O. A., German S. V., Gorin D. A., Ilgach D. M., Meleshko T. K., Yakimansky A. V. An investigation of the morphology of Langmuir films based on molecular polyimide brushes containing magnetite nanoparticles // Protection of metals and physical chemistry of surfaces. 2015. Vol. 51. Is. 3. pp. 396-406.

*С.А. Климова*

Саратовский национальный исследовательский государственный университет  
имени Н.Г. Чернышевского

## МИКРО- И НАНОСТРУКТУРНЫЕ МАТЕРИАЛЫ С ФУНКЦИОНАЛЬНЫМИ СВОЙСТВАМИ ДЛЯ ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНЫХ УСТРОЙСТВ

В статье приводятся результаты фундаментальных работ по созданию микро- и наноструктурированных материалов с функциональными свойствами для энергоэффективных устройств и магнитных датчиков. С точки зрения разработки функциональных материалов для магнитных устройств, приведены результаты получения магнитных микрослойных сплавов Гейслера с буферным слоем для определения магнетокалорического эффекта в структуре. С точки зрения разработки функциональных материалов для энергоэффективных накопителей, приведены результаты исследований полимерных нетканых материалов, полученных с помощью метода электроформования, для усовершенствования сепаратора и катодов суперконденсатора. В заключении приведены результаты исследований морфологии и магнитных свойств наночастиц кобальта и магнетита для разработки чувствительных пленок магниторезистивных датчиков.

**Ключевые слова:** магнетокалорические сплавы Гейслера, мартенситные и аустенитные фазовые переходы, наночастицы кобальта, полиимидный нетканый материал.

При работе солнечных элементов на основе кремния уменьшение срока работы солнечной батареи происходит за счет влияния температуры. Существуют дополнительные отводы тепла, но за счет постоянного нагрева кремниевый элемент со временем приходит в негодность. Используя магнетокалорический эффект, можно создать магнитные холодильные устройства, в которых магнитный материал использовался бы в качестве рабочего тела вместо газа, а процесс намагничивания–размагничивания

использовался бы вместо процесса сжатия–расширения газа. Это позволяет отказаться от использования экологически небезопасных хладагентов, добиться существенного снижения потребляемой холодильными устройствами электрической энергии и значительно увеличить КПД.

Магнетокалорический эффект (МКЭ) – магнитотепловое явление, возникающее при воздействии магнитного поля на вещество, обладающее магнитными свойствами. Магнетокалорический эффект возникает в результате перераспределения внутренней энергии магнитного вещества между системой магнитных моментов его атомов и кристаллической решеткой. Максимальной величины МКЭ достигается при температурах магнитного фазового перехода, например, в области температуры Кюри ферромагнетиков. Приложение магнитного поля вызывает нагрев ферромагнетика (прямой магнетокалорический эффект), а снятие поля – его охлаждение (обратный магнетокалорический эффект). Адиабатичность процесса на практике достигается быстрым изменением магнитного поля.

На данный момент усовершенствовать технологию получения магнетокалорических объектов возможно, с одной стороны, с помощью перехода от массивных материалов полупроводниковых приборов микро- и наноэлектроники к тонким пленкам с сохранением и улучшением выходных параметров и характеристик. С другой стороны, создается возможность синтезировать подобные элементы на разных поверхностях (гладких или шероховатых, гибких или твердых), что позволит в будущем полупроводниковым приборам не перегреваться и сохранять свою работоспособность в течение более продолжительного срока их действия.

Фундаментальная работа [1] связана с тремя различными нестехиометрическими сплавами Гейслера, а именно с Ni-Mn-Sn, Ni-Co-Mn-Sn и Ni-Co-Mn-Al, которые демонстрируют обратный МКЭ за счет наблюдаемого изотермического изменения энтропии  $\Delta S$  и адиабатического изменения температуры  $\Delta T$ . Кристаллическую пленку Гейслера можно получить осаждением на слой аморфного ванадия и последующим быстрым термическим



отжигом. В данной работе многослойная система сплава Гейслера с ванадиевым подслоем выращивали эпитаксиально с помощью магнетронной распылительной установки при температурах подложки от 300 до 500°C без межслойной диффузии.

Тонкие пленки обычно выращивают на монокристаллических подложках толщиной в сотни микрометров, которые обеспечивают огромный теплоотвод, то  $\Delta T$  не могут быть определены непосредственно на этих образцах. Поэтому в этом исследовании было разработано решение, при котором можно избежать этой проблемы. В результате был создан буферный слой ванадия между подложкой и магнетокалорическим сплавом Гейслера. Слой ванадия при комнатной температуре не кристаллизуется. Поэтому был проведен дополнительный скоростной термический отжиг, который позволил достичь кристаллизации сплава NiCoMnSn на поверхности ванадиевого аморфного слоя.

При последующей влажно-химической обработке ванадиевый слой удалялся, что приводило к отделению пленки Гейслера от подложки и перенесению на другие подложки. Таким образом, с одной стороны была создана пленка из сплава Гейслера с возможностью непосредственного измерения адиабатического изменения температуры  $\Delta T$ . С другой стороны, данную пленку после исследований и в процессе удаления ванадиевого слоя можно переносить на другие поверхности с сохранением магнитных свойств.

Отделение МКЭ-пленки от подложки приводит к снижению температуры фазового перехода мартенсит-аустенит из-за отсутствия ограничений подложки, которые препятствуют переходу. Известно, что мартенситная фаза NiCoMnSn демонстрирует значительно меньшую намагниченность, чем ее аустенитная фаза. Поэтому мартенситный переход можно наблюдать, измеряя магнитный момент образца в зависимости от температуры. Различия в поведении магнетокалорической пленки при скоростном термическом отжиге фиксировались с помощью вибрационной магнитометрии.

NiMnSn имеет температуру Кюри около 300 К, т.е. комнатную

температуру. Замена некоторого количества никеля на кобальт приводит к повышению температуры Кюри. Поэтому для сплава NiCoMnSn наблюдается более высокая температура Кюри, чем комнатная, что было установлено при рассмотрении намагниченности в начале и окончании нагрева, т.е. в начале и конце аустенитной фазы. Напротив, начальная температура мартенситной фазы сдвигается на 10 К, а конечная температура сдвигается на 100 К в сторону более низких температур, что приводит к уширению гистерезиса кривых намагниченности для отделенных от подложки сплавов Гейслера. Это изменение связано с эффектами поверхностного окисления и деформации буферного ванадиевого слоя.

Реализация при комнатной температуре и усиление эффекта возможны при безопасном введении сформированных температурным разложением кобальтовых наночастиц разного размера и формы. Магнитные наночастицы обладают потенциалом для различных применений, таких как датчики, ферроизлучатели, высокочастотная электроника, высокопроизводительные постоянные магниты, магнитные хладагенты и каталитические системы. Для создания и использования магнитных наночастиц существует три ключевых вопроса: конечные размерные эффекты, поверхностные эффекты, межчастичные взаимодействия. Уменьшение размера приводит к квантованию и улучшает свойства на наноуровне. В ферромагнитных наночастицах наблюдаются обменные взаимодействия, такие как гистерезисные сдвиги, в которых поверхность ведет себя как спиновое стекло, которое образуется за счет конечного размера и поверхностных эффектов. Кроме того, поверхностные эффекты связаны с нарушением симметрии кристаллической структуры на границе каждой магнитной наночастицы. В работе [2] основное внимание уделяется синтезу наночастиц кобальта различных размеров и различных магнитных фаз. Сравнение структурных характеристик с магнитной характеристикой выявит магнитные взаимодействия. Данные результаты будут опубликованы осенью 2018 года.

Таким образом, перспективы изучения магнетокалорического эффекта и

теплоемкости магнетиков в магнитных полях состоят в следующем. Во-первых, экспериментальное исследование магнетокалорического эффекта позволяет получить информацию о природе магнитного упорядоченного состояния, а также взаимосвязи магнитных и тепловых характеристик. Во-вторых, информация о магнитных фазовых переходах в магнитных материалах интересна, так как именно в области фазового перехода можно достичь наибольшего значения величины МКЭ. В-третьих, экспериментальные данные по МКЭ и теплоемкости позволяют рассчитать изменение магнитной энтропии, изменение энтальпии и изменение удельной намагниченности магнетика при наложении магнитного поля, что дополняет сведения о поведении магнетика в магнитных полях. И, наконец, существенным фактором, стимулирующим исследование магнетокалорического эффекта, является возможность практического применения МКЭ для достижения сверхнизких температур при адиабатическом размагничивании в энергоэффективных установках.

Широкое распространение наноматериалы получили в инновационном направлении технологий по созданию энергоэффективных накопителей. В настоящее время остается актуальной задача снижения размера и веса суперконденсаторов, а также аккумуляторов за счет использования новых типов эффективных и безопасных сепарационных и катодных материалов. В работе [3] показано формирование легкого и тонкого нетканого материала, полученного методом бескапиллярного электроформования. Ультратонкие волокна на основе полиамида-6 (ПА-6) подвергались температурной обработке (термообработке), в течение которой материал подсушивался для удаления остатков растворителя в течение 4 часов при температуре 100°C в муфельной печи SNOL (АВ "Utenos Elektrotechnika", Литва). Среднее значение удельной массы материала ПА-6 составило  $5.6 \pm 0,8$  г/м<sup>2</sup> при значении толщины в  $53 \pm 5$  мкм. В свою очередь, материал ПА-6 обладает высокой воздухопроницаемостью по сравнению, например, чем материал на основе ФП-42Л (в 2,5 раза больше). При этом средний диаметр волокон материала на основе ПА-6 составляет  $99 \pm 19$  нм относительно  $177 \pm 39$  нм.

Проводилось сравнение физических параметров нетканого материала на основе ПА-6 до и после термообработки. Показано, что нетканый материал ПА-6 после термообработки в 1,2 раза более прочный на разрыв, но в 1,5 раза менее эластичный, чем без термообработки. Причем толщина термообработанного материала увеличилась в среднем на 10 мкм, а удельная масса – всего на 0,1 г/м<sup>2</sup>. При этом средний диаметр волокон после термообработки увеличился в 2 раза с 99±19 нм до термообработки, а после термообработки – 219 ± 20 нм.

В работе [4] исследованы полиамидные нетканые материалы с покрытием из нержавеющей стали, применяемые в качестве основы электродов источников и накопителей энергии. Нанесение металлического покрытия осуществлялось с помощью вакуумного магнетронного распыления. Установлено формирование сплошного металлизированного нетканого материала при напылении нержавеющей стали в течение 4-10 минут. Сопротивление металлизированного нетканого материала относительно материала без покрытия уменьшилось на 7 порядков для нетермообработанного (с 10<sup>12</sup> Ом до 10<sup>5</sup> Ом), а на 5 порядков термообработанного нетканого материала. Установлено, что напыление проводящего покрытия из нержавеющей стали в вакууме влияет на размер нановолокон и приводит к уменьшению диаметра волокон в среднем в 1,5 раза за счет испарения остаточного растворителя. При напылении покрытия нержавеющей стали удельная масса материала, как без термообработки, так и после термообработки увеличивается на 1,2 ± 0,2 г/м<sup>2</sup>.

Таким образом, процессы бескапиллярного электроформования позволяют получать тонкие нетканые материалы с уникально малым диаметром волокна. Кроме того, существует однородность структуры и параметров волокна по длине (непрерывные волокна, отсутствие дефектов (капель, обрывков)), а механические свойства такие, как предел прочности, прочность на разрыв, на изгиб и на сжатие, модули упругости возрастают при уменьшении диаметра волокон. Металлизированное покрытие из нержавеющей стали, полученное путем вакуумного осаждения пленки на полимерные волокна, показало увеличение механических и электрических свойств нетканого

материала. Для удаления остатков растворителя применяли термообработку материала до и после его металлизации.

*Фундаментальные работы выполнены при поддержке Немецкой службы академических обменов (DAAD): проект № A/12/86233 «Магнетокалорический эффект и его отношение к свойствам запоминания формы тонких пленок на основе магнитных материалов NiCoMnAl и CoMnTiGe», проект № A 57320203 «Изучение влияния изменения конфигурации магнитных наночастиц во внешних вращательных магнитных полях на гигантскую магниторезистивную амплитуду и чувствительность» (2017–2018 гг.) в университете г. Билефельда (физический факультет, научная группа «Тонкие пленки и наноструктуры»); а также в рамках инициативной темы «Разработка и внедрение гибких электродных материалов на основе электроформованного полимера для гибридного накопителя электрической энергии».*

#### *Список использованной литературы*

1. Teichert N., Kucza D., Yildirim O., Yuzuak E., Dincer I., Behler A., Helmich L., Boehnke A., Klimova S., Waske A., Elerman Y., Huetten A. Structure and Giant Inverse Magnetocaloric Effect of Epitaxial Ni-Co-Mn-Al Films // Physical Review B. 2014. Vol. 91. Is. 18. pp. 184405-184412.
2. Klimova S. A., Fokin N., Ennen I., Ramermann D., Hütten A. Synthesis and study of magnetic nanoparticle systems of iron oxide, cobalt and their mixtures // Proceeding of the Annual International Conference “DPG Spring Meeting 2018” (DPG’18). Magnetism Division. - 11-16 March 2018, Berlin (Germany). – P. 312.
3. Усачев А. Н., Климова С. А. Метод электроформования получения нетканого материала на основе полимерных нановолокон // Нано- и биомедицинские технологии. Управление качеством. Проблемы и перспективы. Сборник научных статей / под ред. С.Б. Вениг. – Саратов, СГУ. 2016. С. 150-158.
4. Klimova S. A., Atkin V. S., Usachev A. N., Pchelkin I. A., Presnyakov D. V., Mitin D. M., Savonin A. A., Kirillova I. V. Metallized Nonwoven Electrospun Polyamide-6 Nanofibers for Energy Production and Storage // Fibre Chemistry. 2017. Vol. 49. Is. 3. pp. 200–204.

***О.Ю. Кондратьева<sup>1</sup>, Д.В. Терин<sup>1,2</sup>, С.А. Корчагин<sup>2</sup>, Е.В. Кондратьева<sup>1</sup>***

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

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

## **ОБРАБОТКА СЭМ ИЗОБРАЖЕНИЙ ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПОРОГА ПРОВОДИМОСТИ**

В работе исследуются двух-фазные композитные системы вольфрам-

полистирол с целью определения их текущей перколяционной проводимости системы. С этих позиций нам представляется эффективным подход по цифровой обработке СЭМ и АСМ изображений модельных объектов методами Gwiddion. Задача сводится к проблеме определения положения зёрен и нахождения локальных экстремумов на поверхности изображений.

**Ключевые слова:** вольфрам-полистирол, эффективная проводимость, перколяция, Gwiddion, Otsu's method

Изучение электрофизических свойств композитных сред является одной из приоритетных задач современного материаловедения, в качестве объекта взят двухфазный композит: вольфрам -полистирол (рис.1). Представляет интерес изучение сравнительно узкой окрестности порога протекания - критической концентрации, при которой происходит фазовый переход металл–диэлектрик. В качестве вспомогательной задачи эффективной проводимости, представляет интерес характеристика цифровых СЭМ изображений композита, как основы для 3D модели композита со случайно распределенными в пространстве и хаотически ориентированными включениями. СЭМ изображения получены на сканирующем электронном микроскопе Tescan Mira II в режиме SE/BSE. На поверхности заметна сложная структура данных, поэтому для каждого снимка поверхности проводили выделение зёрен или частиц модульной программой для анализа двумерных данных Gwiddion, применив алгоритм водораздела. Этот алгоритм обычно задействуется для определения локальных минимумов и разделения изображения на сегменты в обработке изображений. Поскольку проблема определения положения зёрен может сводиться к проблеме нахождения локальных экстремумов на поверхности, этот алгоритм также можно использовать для нужд разделения и выделения зёрен. Для удобства в дальнейшем мы будем считать данные инвертированными в направлении z при описании этого алгоритма (т.е. вершины зёрен формируют локальные минимумы). Мы применяем две стадии анализа зёрен.

1. Фаза обнаружения зёрен: в каждой точке инвертированной поверхности помещается виртуальная капля воды. В случае, если капля не находится в локальном минимуме, она следует по пути наискорейшего спуска чтобы минимизировать свою потенциальную энергию. Как только капля достигает

любого локального минимума, она остаётся там и покоится на поверхности. Подобным образом она частично заполняет объём локального минимума, этот процесс повторяется несколько раз.

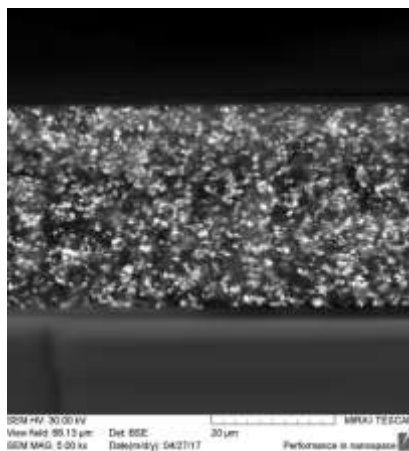


Рис.1. СЭМ изображение композита вольфрам – полистирол

В результате получается система водоёмов различного размера, заполняющих впадины в инвертированной поверхности. После этого рассчитывается площадь каждого водоёма и наименьшие из них отбрасываются в предположении, что они формируются в локальных минимумах, образованных шумом. Большие водоёмы используются для определения положения зёрен для разделения на следующем шаге. Для рис.1 по методу водораздела - общее число зерен 2800, средняя площадь зерна  $347 \cdot 10^{-15} \text{ м}^2$ , средний размер зерна 300 нм. Подобным образом можно устранять также шум на АСМ изображениях металл-полимерных объектов.

2. Фаза разделения: зерна, найденные на первом шаге, помечаются (каждое своим уникальным номером). Капли воды продолжают падать на поверхность и заполнять локальные минимумы. Общее число шагов падения капли в каждую точку поверхности регулируется параметром Число шагов. Поскольку зёрна уже обнаружены и помечены после первого шага, следующие пять ситуаций возможны после достижения каплей локального минимума: а. капля достигла места, ранее отмеченного как определённое зерно. В этом случае капля объединяется с зерном, т.е. помечается как часть того же зерна; б. капля достигла места, где нет зерна, но отмеченное зерно найдено в ближайшей

окрестности капли. В этом случае капля снова объединяется с зерном; с. Капля достигла места, где нет зёрен, и при этом зёрен не было даже в ближайшей окрестности капли. В этом случае капля никак не помечается; d. капля достигла места, где нет зерна, но более одного отмеченного зерна найдено в ближайшей окрестности. (т.е. в окрестности нашлось два разных зерна). В этом случае капля помечается как граница зерна; e. капля достигла места, помеченного как граница зерна. В этом случае капля также помечается как граница зерна.

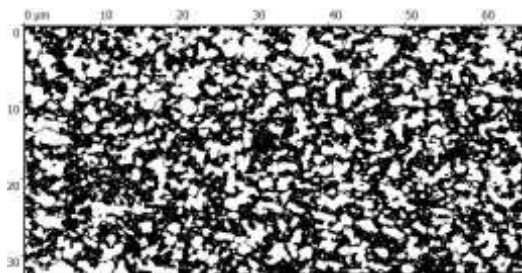
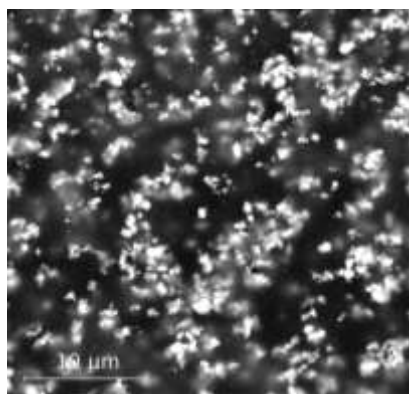
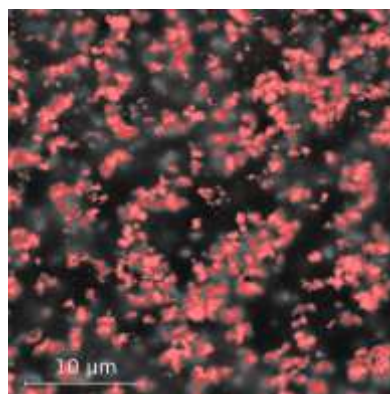


Рис. 2. Выделение зерен



а)



б)

Рис. 3. СЭМ изображения поверхности композита: а), она же после сегментации по методу Оцу б).

Другой способ выделения зерен из маски – обнаружение объектов методом Оцу. Метод Оцу (Otsu's method) использует гистограмму изображения для расчета порога. В нашем случае выборка - пиксели различной яркости, которая может принимать целые значения от 0 до 255. Из гистограммы обнаружено, что имеется два четко разделяющихся класса.

Суть метода Оцу заключается в том, чтобы выставить порог между классами таким образом, чтобы каждый из них был как можно более «плотным», по сути это сводится к минимизации внутриклассовой дисперсии,



которая определяется как взвешенная сумма дисперсий двух классов. Изображения импортировались в пакет Gwyddion [5], где проводилась сегментация изображения по методу Оцу, при этом маской выделялись проводящие частицы. Изображение выделенных участков показано на рис.3.

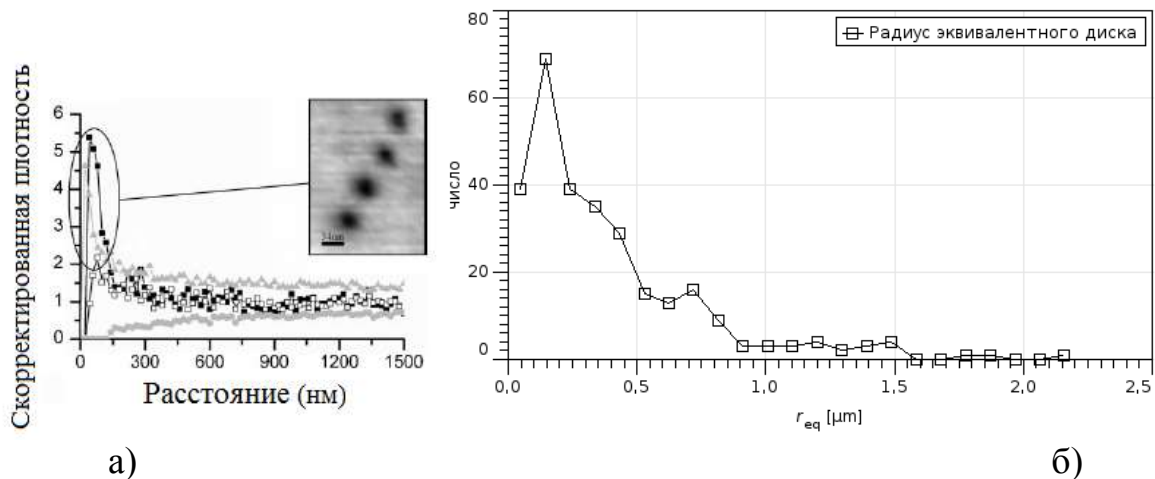


Рис. 4. Радиальная функция распределения положений краевой дислокации для образца, границы серого показывают 99% доверительные пределы для случайного распределения. Заполненные символы указывают экспериментальные данные, открытые символы показывают те же данные с удаленными точками данных линейной матрицы. На вставке показана топографическая картина линейного массива краевых дислокаций в масштабе 9 нм - а), статистика попарных расстояний – б).

Описание проводимости композита может быть получено из этих данных различными способами: усреднением по методу эффективных параметров и т.п. Если расстояние до ближайшего соседа меньше определённого (порядка 1-2 нанометров), то такая плёнка считается проводящей. Известно, что проводимость диэлектрического зазора проявляется на расстояниях не более 2 нм, то с точки зрения проводимости нас интересуют кластеры частиц, где зазоры между частицами не превышают этого расстояния. Процесс поиска таких кластеров по данным о координатах частиц мы проводили методом поиска ближайших соседей. По полученным здесь результатам рассчитана статистика зерен, из которой нужен средний размер зерна для того чтобы считать проводимость. Информация о положении и размере отдельных зёрен экспортировалось из программы Gwyddion, затем оценивалось попарное расстояние для каждой пары зёрен, полученная статистика попарных

расстояний приведена на рис.4б.

Затем, имея сетку координат отдельных частиц и зная зависимость проводимости от длины зазора решалась типовая электротехническая задача определения суммарной проводимости.

*Работа выполнена при финансовой поддержке гранта РФФИ (проект 18-07-00752 А).*

#### *Список использованной литературы*

1. Смирнов А.В., Аткин В.С., Гребенников А.И., Ревзина Е.М., Кондратьева О.Ю., Синёв И.В. Получение сферических микрочастиц вольфрама в поле ультразвуковой волны в присутствии активатора // Известия Саратовского университета. Новая серия. Серия: Физика. 2015. Т. 15. № 4. С. 13-17.
2. Кондратьева Е.В., Кондратьева О.Ю. // В сборнике: Наноэлектроника, нанофотоника и нелинейная физика Доклады XII Всероссийской конференции молодых ученых. 2017. С. 108.
3. Колесникова А.С., Глуховской Е.Г., Кондратьева О.Ю. // В сборнике: Практическая биомеханика материалы докладов Всероссийской конференции молодых ученых с международным участием, Саратов, 2017. С. 73-74.
4. Кондратьева О.Ю., Терин Д.В., Ревзина Е.М. Информационные технологии: исследовательские расчеты в среде mathcad. Введение // Учебно-методическое пособие / Mauritius, 2018.
5. Кондратьева Е.В., Кондратьева О.Ю. Экономический анализ эффективности прогнозирования успеваемости на основе FUZZY LOGIC // В сборнике: Экономическая наука в Саратовском университете: прошлое и современность Материалы Международной конференции в рамках Международного научного симпозиума, посвященного 100-летию гуманитарного образования в СГУ "Столетие гуманитарного образования в Саратовском государственном университете: диалог времен - прошедшего, настоящего и будущего". Под редакцией О.Ю. Челноковой. 2017. С. 30-32.

***В.В. Симаков, И.Д. Осыко, В.А. Суханов, И.В. Синёв***

Саратовский национальный исследовательский государственный университет  
имени Н.Г. Чернышевского

### **ВЛИЯНИЕ ПАРОВ ВОДЫ НА ПРОВОДИМОСТЬ ТОНКОЙ ПЛЕНКИ ДИОКСИДА ОЛОВА В УСЛОВИЯХ ОСВЕЩЕНИЯ ПРИ КОМНАТНОЙ ТЕМПЕРАТУРЕ**

Представлены результаты экспериментальных и теоретических исследований влияния освещения на изменение проводимости тонкой пленки диоксида олова при воздействии паров воды при комнатной температуре. Показано, что присутствие в окружающей атмосфере паров воды может приводить как к увеличению проводимости тонкой пленки, так и к ее уменьшению в зависимости от интенсивности освещения. Предложена модель, описывающая изменение проводимости тонкой пленки диоксида олова при воздействии паров

воды в условиях освещения.

**Ключевые слова:** Газочувствительность, диоксид олова, тонкие пленки

## **INFLUENCE OF VAPOR WATERS ON CONDUCTIVITY OF THIN FILM TIN DIOXIDE UNDER ILLUMINATION AT ROOM TEMPERATURE**

This article demonstrates the results of investigation of illumination influence on the gas-sensitivity of tin dioxide thin film to water vapor at room temperature. It is shown that the presence of water vapor in the surrounding atmosphere can increase or decrease conductivity of thin film, this effect depends on the illumination intensity. A model describing the change conductivity of tin dioxide thin film to water vapor under illumination is offered.

**Keywords:** Gas sensitivity, tin dioxide, thin films

Системы детектирования газовых смесей и запахов, включающие полупроводниковые сенсоры газа, устройства предварительной обработки сигналов, контроля и управления рабочим режимом технологических комплексов, могут быть сформированы на единой подложке методами микро- и нанотехнологий [1]. Полупроводниковые газовые сенсоры на основе оксидов металлов (например, диоксида олова) обычно работают при температурах свыше 300 °С [2], что ограничивает возможности их применения. Использование энергии внешнего излучения открывает перспективы снижения рабочей температуры сенсоров газа до комнатной [3].

В работе представлены результаты влияния паров воды на изменение проводимости тонкой пленки диоксида олова в атмосфере паров воды при освещении светодиодом и в темноте.

Слои диоксида олова формировались методом высокочастотного магнетронного распыления стехиометрической мишени SnO<sub>2</sub> [4]. Поверх пленки диоксида олова через маску напылялась система Pt-контактов. Исследования электрофизических свойств полученных структур проводились с помощью аппаратно-программного комплекса [5]. Температура сенсоров во всех экспериментах поддерживалась на уровне 30±1°С с помощью термостата типа ТС-1/80. Газовые пробы, содержащие пары воды, составлялись путем барботирования деионизованной воды потоком сухого воздуха. Газочувствительная структура на основе пленки диоксида олова помещалась в

измерительную камеру объемом  $2 \text{ см}^3$ , через которую продувалась анализируемая газовая смесь с расходом  $100 \text{ ссст}$ . Для освещения сенсора использовался светодиод марки DFL-5AP4SC-400 с излучением в полосе длин волн  $397...409 \text{ нм}$ .

На рис. 1, а представлена динамика отклика тонкой пленки диоксида олова к парам воды в темноте и в условиях освещения с интенсивностью  $I_{UV} = 0,08 \text{ лм}$ . Обнаружено, что напуск паров воды может приводить как к увеличению проводимости сенсора, так и к ее уменьшению в зависимости от интенсивности освещения (светового потока) активного слоя сенсора.

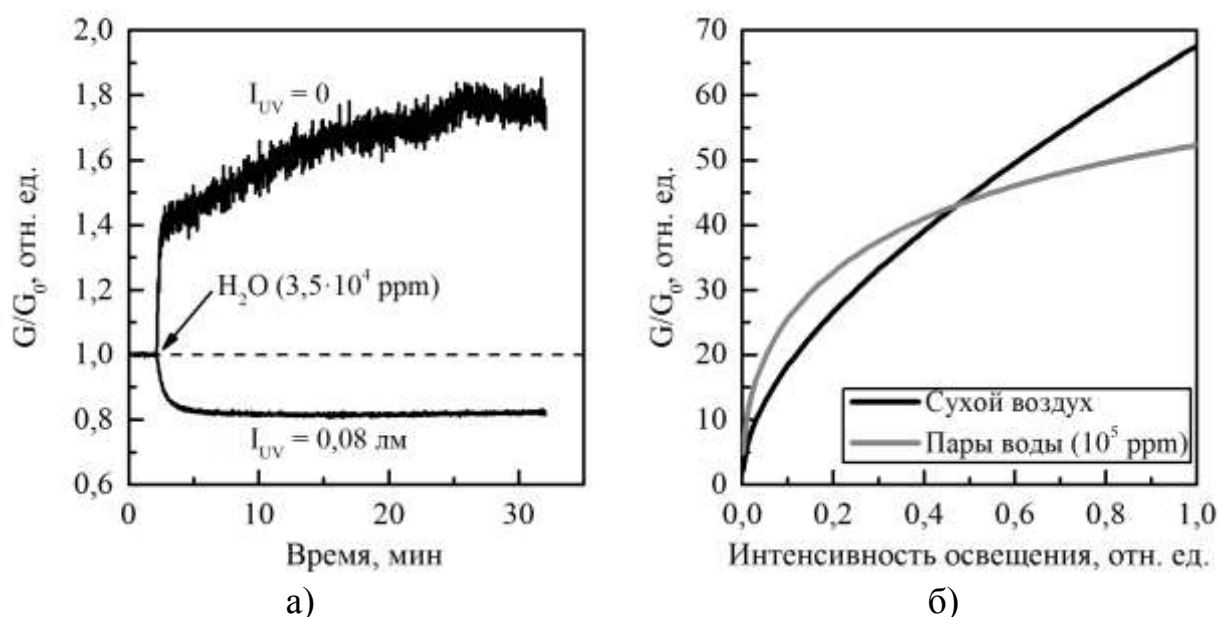


Рис. 1. Динамика изменения проводимости тонкой пленки  $\text{SnO}_2$  в атмосфере паров воды (а) и люкс-амперные характеристики в атмосфере сухого воздуха и паров воды (б),  $G_0$  – базовый уровень проводимости

Для объяснения наблюдаемых экспериментальных результатов предложена модель, основана на предположении существования нескольких типов центров адсорбции на поверхности диоксида олова. На одном типе центров возможна как адсорбция молекул воды, так и частиц кислорода, а на другом типе центров адсорбируются только молекулы воды:

$$1 - \eta + \delta_t \cdot \frac{n_{tD}}{n_{tD} + \eta} = \delta_1 \cdot \frac{\eta}{\eta + n_{1D}} + \delta_2 \cdot \frac{\eta}{\eta + n_{2D}}, \quad (1)$$

где  $\eta$  – относительная концентрация электронов в зоне проводимости;  $\delta_t$  – относительная концентрация ловушек в объеме зерна;  $n_{tD}$  – параметр,

зависящий от интенсивности освещения;  $\delta_1$  и  $\delta_2$  – число мест, на которые может адсорбироваться газ на единице поверхности на центрах 1-го и 2-го типа, соответственно;  $n_{1D}$  и  $n_{2D}$  – параметры, зависящие от давления кислорода и паров воды, температуры и материала активного слоя сенсора.

На рис. 1, б представлены люкс-амперные характеристики пленки диоксида олова в атмосфере сухого воздуха и в парах воды. При низких интенсивностях освещения проводимость в парах воды выше, чем в атмосфере сухого воздуха. Следовательно, напуск паров воды в условиях освещения с малой интенсивностью приведет к увеличению проводимости пленки диоксида олова. В области высоких интенсивностей освещения уровень проводимости в парах воды ниже, чем в атмосфере сухого воздуха. Поэтому напуск паров воды при высокой интенсивности освещения приведет к уменьшению проводимости пленки диоксида олова. Таким образом, величина светового потока определяет характер отклика газочувствительной структуры к парам воды.

В работе представлены результаты исследований влияния интенсивности освещения на динамику отклика тонкой пленки диоксида олова к парам воды. Предложена модель совместной адсорбции нескольких газов-окислителей на энергетически неоднородной поверхности зерна широкозонного полупроводника в условиях его освещения. Результаты моделирования показывают, что величина светового потока определяет тип отклика тонкой пленки диоксида олова на воздействие паров воды при комнатной температуре.

*Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ в рамках научных проектов № 16-07-00821.*

#### *Список использованной литературы*

1. Кисин В.В., Ворошилов С.А., Сысоев В.В., Симаков В.В. Трехэлектродный датчик газа // Приборы и техника эксперимента. 1995. Т.38. №5. С.178-181.
2. Симаков В.В., Ворошилов С.А. Поверхностный ионный транспорт в тонкопленочных хеморезисторах // Вестник Саратовского государственного технического университета. 2006. Т. 4. № 1 (16). С. 38-40.
3. Симаков В.В., Синёв И.В., Смирнов А.В., Осыко И.Д., Гребенников А.И., Сергеев С.А. Влияние освещения на газочувствительность тонких пленок диоксида олова к парам этанола при комнатной температуре // Нано- и микросистемная техника. 2017. Т.19. №1. С.34-40.

4. Синева И.В., Смирнов А.В., Гребенников А.И., Сякина С.Д., Симаков В.В., Кисин В.В. Влияние предварительного нагрева на распознавательную способность мультисенсорной микросистемы // Нано- и микросистемная техника. 2014. № 1. С. 52-55.
5. Смирнов А.В., Гребенников А.И., Грибов А.Н., Симаков В.В., Синева И.В., Кисин В.В. Отклик газочувствительной микросистемы на запах перегретой изоляции электрического кабеля // Нано- и микросистемная техника. 2014. № 2. С. 53-56.

**В.В. Симаков, В.А. Суханов**

Саратовский национальный исследовательский государственный университет имени Н.Г. Чернышевского

### **ВОЛЬТАМПЕРНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ГАЗОЧУВСТВИТЕЛЬНЫХ СТРУКТУР НА ОСНОВЕ ПОЛИКРИСТАЛЛИЧЕСКИХ ПЛЕНОК ДИОКСИДА ОЛОВА**

В работе представлены результаты экспериментальных и теоретических исследований вольтамперных характеристик газочувствительных структур на основе поликристаллических пленок SnO<sub>2</sub>.

**Ключевые слова:** Диоксид олова, газочувствительность, вольт-амперные характеристики.

### **CURRENT-VOLTAGE CHARACTERISTIC OF GAS-SENSITIVE STRUCTURES BASED ON POLYCRYSTALLINE TIN DIOXIDE THIN FILMS**

Current-voltage characteristics of a polycrystalline thin-film gas sensor has been studied and theoretical model of the charge transport in the polycrystalline thin-film gas sensor has been proposed.

**Keywords:** Tin dioxide, gas sensitivity, current-voltage characteristic

В настоящее время, хеморезистивные структуры на основе поликристаллических пленок диоксида олова (SnO<sub>2</sub>) широко используются для обнаружения газов окислителей и восстановителей [1]. Это обусловлено их высокой чувствительностью, относительно низкими рабочими температурами и низкой стоимостью изготовления. Кроме того, поликристаллические слои диоксида олова имеют большую удельную площадь поверхности. В качестве регистрируемого сигнала (отклика) хеморезистивных газовых сенсоров, как правило, используется величина проводимости их активных слоев в анализируемой газовой пробе. Базовый уровень проводимости сенсоров на основе диоксида олова определяется адсорбцией кислорода на их поверхности,

частицы которого индуцируют поверхностные состояния акцепторного типа, и локализацией электронов из зоны проводимости объема зерна [2]. Увеличение проводимости сенсора в газовой пробе, содержащей газ-восстановитель, происходит из-за адсорбции частиц этого газа и как следствие вблизи поверхности зерна возникают поверхностные состояния донорного типа, с которых электроны могут термически возбуждаться в зону проводимости зерна поликристаллического слоя [3]. С точки зрения приборного применения, вольтамперная характеристика (ВАХ) газочувствительных структур определяет рабочий диапазон измерительных напряжений и/или токов, а также величину чувствительности сенсоров газа к присутствию в атмосфере газ-восстановителей [4-5].

В работе представлены результаты экспериментальных исследований ВАХ газочувствительных структур на основе поликристаллических пленок диоксида олова, а также сформулирована математическая модель переноса заряда в поликристаллических слоях диоксида олова, учитывающая инжекцию носителей заряда из приконтактных областей, процессы захвата электронов на поверхностных состояниях акцепторного и донорного типа, индуцированных адсорбированными частицами газов.

Математическая модель переноса заряда сформулирована в диффузионно-дрейфовом приближении с учетом наличия на межзеренных границах поверхностных состояний акцепторного и/или донорного типа. В рамках предложенной модели ток через образец остается постоянным в любой точке газочувствительного поликристаллического слоя:

$$i = \eta \cdot \epsilon + \frac{\partial \eta}{\partial \xi} = const, \quad (1)$$

где  $\eta = \frac{n}{N_0}$  – нормированная концентрация электронов  $n$  на концентрацию полностью ионизованных доноров в объеме зерна поликристаллического образца доноров  $N_0$ ;  $\epsilon = \frac{E}{E_T}$  – нормированное электрическое поле  $E$  в объеме зерна;  $E_T = \frac{\varphi_T}{L_D}$  – величина теплового поля;  $\varphi_T = \frac{kT}{q}$  – тепловой потенциал;

$L_D = \sqrt{\frac{\varepsilon\varepsilon_0 \cdot kT}{q^2 \cdot N_D}}$  – длина Дебая;  $\xi = \frac{x}{L_D}$  – расстояние от анода  $x$  нормированное на длину Дебая.

Распределение электрического поля вдоль образца определяется из решения уравнения Пуассона:

$$\frac{\partial \varepsilon}{\partial \xi} = \eta_D - \eta - \eta_{a0} \cdot \frac{\eta}{\eta + n_{a0}}, \quad (2)$$

где  $\eta_D = \frac{N_D(x)}{N_0}$  – нормированная концентрация объемных доноров;  $\eta_{a0} = \frac{N_a(x)}{N_0}$  – нормированная концентрация акцепторных состояний на границе зерна;  $n_{a0} = \frac{n_a}{N_0}$  – нормированная концентрация акцепторов, когда уровень Ферми совпадает с акцепторным уровнем;  $n_{a0} = \frac{N_c}{N_0} \cdot \exp\left(-\frac{E_c - E_a}{kT}\right)$ ;  $E_c$  и  $E_a$  – положение дна зоны проводимости и поверхностного акцепторного уровня, соответственно.

Напряжение, падающее на газочувствительной структуре, определялось с помощью интегрирования распределения электрического поля вдоль образца:

$$U = \varphi_T \cdot \int_0^{L_D} \varepsilon(\xi) d\xi. \quad (3)$$

где  $L$  – расстояние между контактами.

На рисунке представлены ВАХ газочувствительной структуры на основе поликристаллической пленки диоксида олова в атмосфере паров воды. Зависимости носят нелинейный характер, а величина дифференциальной проводимости газочувствительных структур немонотонно зависит от величины приложенного напряжения.

На ВАХ газочувствительных структур можно выделить три области: в области малых напряжений ( $< 30$  В) вольтамперная характеристика носит линейный характер ( $I \sim U$ ), в области напряжений 35...50 В наблюдается сублинейная зависимость ( $I \sim U^{0,49}$ ), что может быть связано с процессами захвата инжектированных в образец носителей заряда примесными уровнями на границах зерен, а в области высоких напряжений ( $> 50$  В) наблюдается сверхлинейный рост тока с увеличением напряжения ( $I \sim U^{1,72}$ ), что связано с



инжекцией носителей заряда в объем образца.

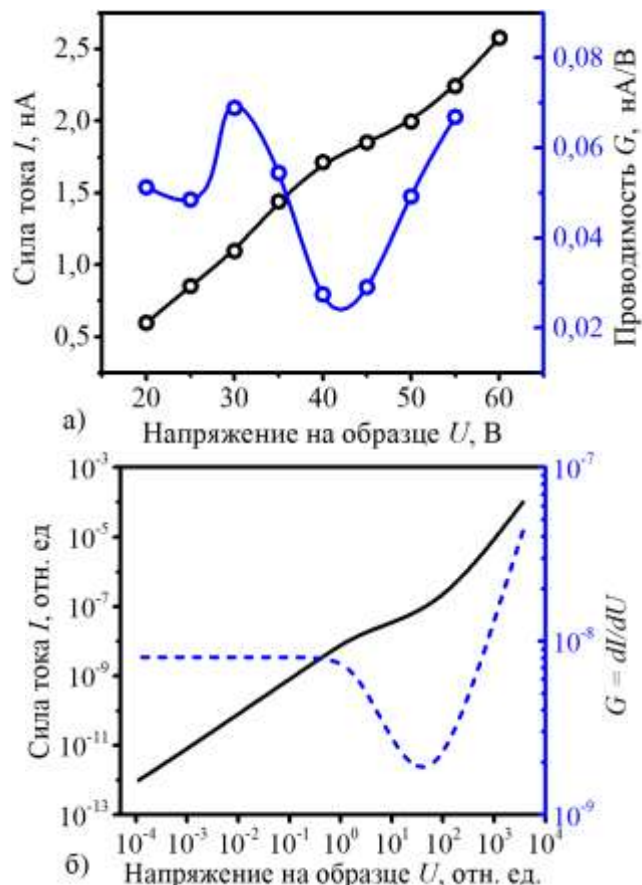


Рисунок – Вольтамперные характеристики газочувствительной структуры на основе поликристаллической тонкой пленки диоксида олова в атмосфере паров воды (а) и результаты расчета по предложенной модели (б)

Таким образом, в работе обнаружено, что вольтамперные характеристики поликристаллических газочувствительных структур в атмосфере паров воды носят нелинейный характер. Предложенная модель транспорта заряда в поликристаллических газочувствительных структурах качественно описывает наблюдаемые экспериментальные факты.

#### Список использованной литературы

1. Righettoni, M. Si:WO<sub>3</sub> Sensors for Highly Selective Detection of Acetone for Easy Diagnosis of Diabetes by Breath Analysis M. Righettoni // Analytical Chemistry. 2010. Vol. 2010, p. 3581-3587.
2. Гаман, В. И. Физика полупроводниковых газовых сенсоров / В. И. Гаман. Томск: НТЛ, 2012. 112 с.
3. Симаков, В. В. Поверхностный ионный транспорт в тонкопленочных хеморезисторах В. В. Симаков // УДК 621.382, 2006. С. 1-3.
4. Simakov, V. V. I-V characteristics of gas-sensitive structures based on tin oxide thin films V. V. Simakov // Sensors and Actuators B: Chemical. 2006. Vol. 116, p. 221-225.
5. Симаков, В. В. Влияние освещения на газочувствительность тонких пленок диоксида олова к парам этанола при комнатной температуре В. В. Симаков // Нано- и микросистемная техника. 2017. Т. 19, № 1, с. 34-40.

*А.В. Смирнов<sup>1,2</sup>, В.С. Аткин<sup>2</sup>, А.В. Горбунова<sup>2</sup>*

<sup>1</sup> Институт радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН, г. Москва

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

## **ФОРМИРОВАНИЕ МЕТАЛЛ-ПОЛИМЕРНОГО ФУНКЦИОНАЛЬНОГО ПОКРЫТИЯ**

В работе представлена методика получения металл – полимерного нанокompозитного покрытия на основе полистирола и вольфрама с размером частиц наполнителя порядка 100 нм. Изучено влияние плазменной обработки на морфологию поверхности такого покрытия.

**Ключевые слова:** металл-полимерный композит, вольфрам, полистирол, плазменное травление, поверхностная модификация.

## **FORMATION OF THE METAL-POLYMERIC FUNCTIONAL COATING**

New technique of metal-polymeric nanocomposite coating (based on polystyrene matrix and tungsten filler with particle size within the order of 100 nm) formation is present at this paper. Impact of plasma treatment on coating surface morphology was studied.

**Keywords:** metal-polymeric composite, tungsten, polystyrene, plasma etching, surface modification

**Введение.** Разработка и исследование новых и модификация известных композиционных материалов на основе металлов и полимеров это традиционное и активно развивающееся направление науки и техники [1-3]. Широкие возможности применения таких материалов поддерживают интерес научного сообщества к данной области исследования [4,5].

**Методика эксперимента.** В качестве исходных материалов использовался вольфрам марки W0.8 со средним размером частиц 0,8 мкм и гранулы полистирола (ПС, размер гранул 3 мм). Для уменьшения среднего размера частиц порошок вольфрама подвергался обработке в шаровой планетарной микромельнице Pulverisette 7 (Fritch, Германия). В размольную чашу также добавлялись гранулы полистирола. Соотношение металла к полимеру при помоле 9:1 (по весу). Обработка проводилась в течение 100 и 200 циклов. Цикл состоит из двух этапов – 5 минут работы (помола) и 5 минут паузы (простоя). Полученный в результате помола порошок W+ПС помещался

в пробирку с органическим растворителем  $CCl_4$ , в соотношении 1:10 по весу. Полученная суспензия подвергалась обработке в ультразвуковой (УЗ) ванне в течение 20 минут с периодическим помешиванием. После обработки суспензия отстаивалась в течение 72 часов. Исследование гранулометрического состава порошков осуществлялось с помощью анализатора размеров частиц Zetasizer Nano Series (Malvern Instruments Ltd, Англия). Металл-полимерное покрытие производилось методом погружения, в качестве подложек использовались полированные пластины кремния. Модификация поверхности осуществлялась в камере вакуумной установки Orion-40T (VTC, Республика Корея). Пластины с нанесенным металл-полимерным композиционным покрытием располагались на мишени магнетрона в зоне эрозии. Подробнее методика обработки представлена в работе [6]. Анализ морфологии поверхности проводился с использованием растрового электронного микроскопа (РЭМ) Mira II (Tescan, Чехия).

**Результаты и обсуждение.** На рисунке 1 представлены гистограммы распределения порошков, полученных в результате помола. Средний размер частиц финального продукта составил 109,5 нм.

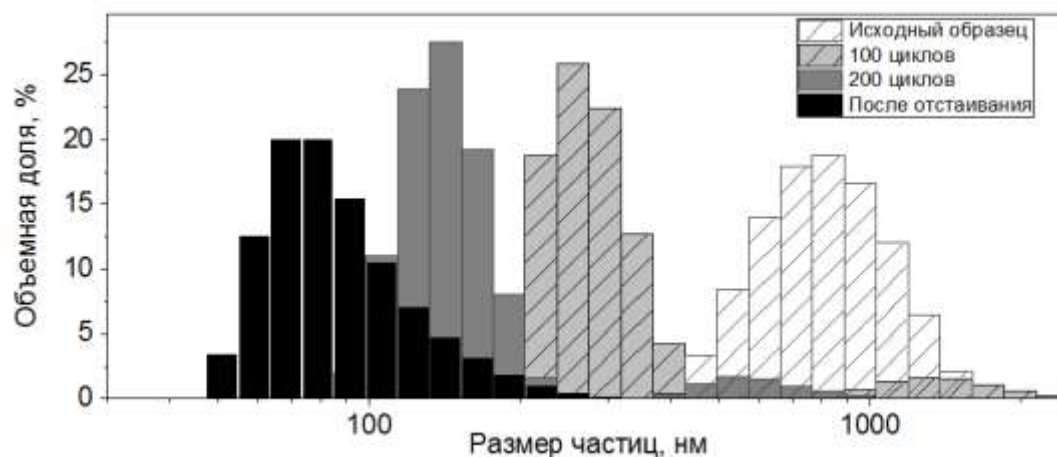


Рисунок 1. Гистограммы распределения порошков, полученных в результате помола

На рисунке 2 представлено изображение поверхности металл-полимерного покрытия до (а) и после (б) обработки в плазме аргона, а также изображение скола (в). Для примера демонстрируются изображения образцов с содержанием наполнителя около 50 об.%. Микрофотографии получены в режиме BSE

(отражённых электронов) и SE (вторичных электронов). BSE режим позволял определить наличие включений микрочастиц вольфрама и их распределение по объёму композита, SE – подробнее изучить морфологию поверхности. Средняя толщина плёнки составляет порядка 15 мкм. На поверхности наблюдается наличие пор различной формы, глубиной от 1 до 3 мкм. Как видно из рисунка, морфология покрытия существенно отличается от морфологии поверхности обработанных в плазме плёнок полистирола [6]. Частицы равномерно распределены по объёму плёнки, наблюдается наличие агломератов частиц вольфрама, что вероятно связано с высоким содержанием частиц наполнителя. В образцах с объёмным содержанием от 0,1 до 15 об. % подобное не наблюдалось.

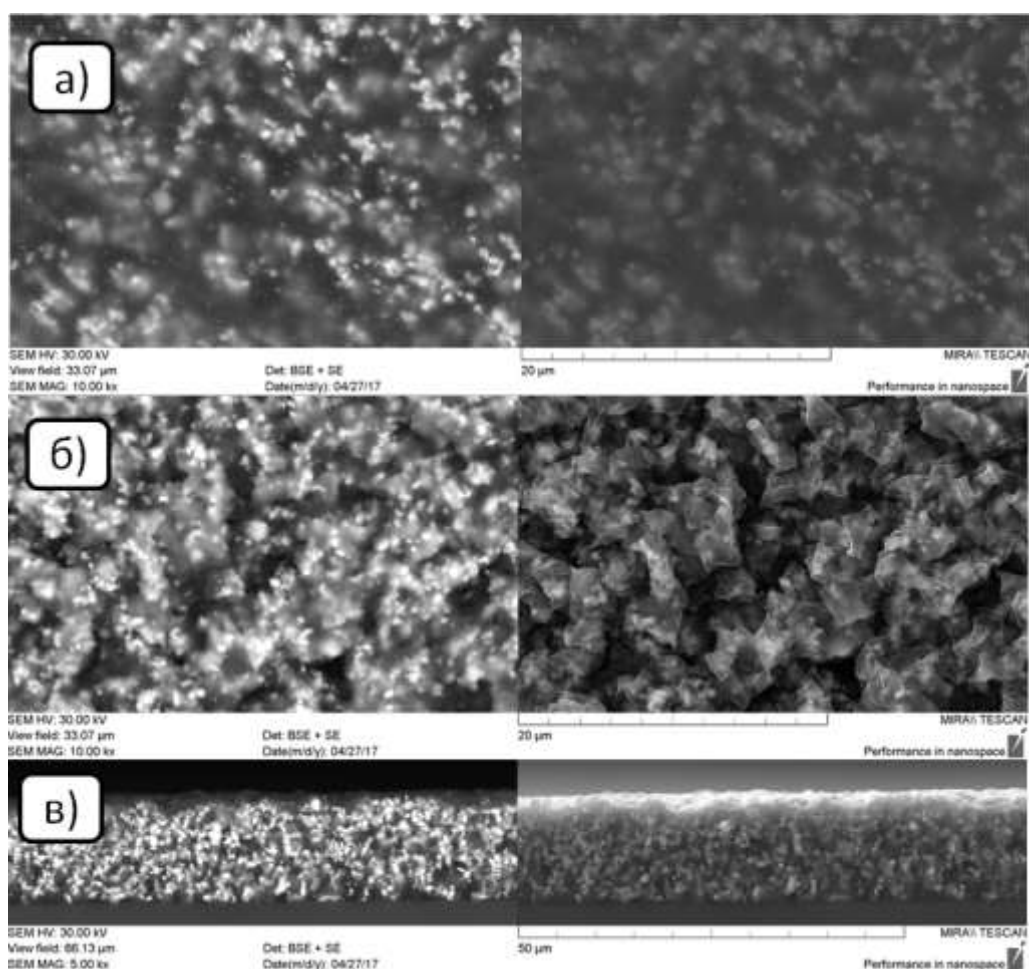


Рисунок 2. РЭМ – изображение поверхности металл-полимерного покрытия до (а) и после (б) обработки в плазме аргона; скол покрытия после обработки (в)

Таким образом, при использовании плазменного травления, как метода модификации металл-полимерного композиционного покрытия, можно сформировать на его поверхности открытые поры размерами от 1 до 3 мкм. С практической точки зрения применение таких покрытий возможно в области акустических биодатчиков в качестве чувствительных слоёв, состоящих из мембраны и иммобилизованных биологических объектов. Варьированием содержания наполнителя можно существенно менять акустические свойства такого покрытия и тем самым адаптировать его параметры под конкретные задачи исследователей.

*Работа выполнена при частичной финансовой поддержке Российского Фонда Фундаментальных Исследований (проекты № 17-307-50007 и 16-07-00821).*

*Список использованной литературы*

1. Помогайло А. Д., Розенберг А. С., Уфлянд И. Е. Наночастицы металлов в полимерах. – М.: Химия, 2000.
2. Смирнов А. В. и др. Формирование поглощающего покрытия на основе металл-полимерного композита для пьезоэлектрических резонаторов //Радиотехника. – 2016. – №. 11. – С. 42-45.
3. Смирнов А.В., Горбачёв И.А., Синёв И.В. Влияние содержания вольфрама на механические свойства и термостойкость композиционного материала на основе полистирола //Физико-химические аспекты изучения кластеров, наноструктур и наноматериалов. – 2015. – Вып. 7. – С. 471-478.
4. Смирнов А. В., Синёв И. В. Капсулирование микрочастиц вольфрама в полистирол //ПОЛИКОМТРИБ-2015. – 2015. – С. 172-172.
5. Smirnov A.V., Atkin V.S., Gorbachev I.A., Grebennikov A.I., Sinev I.V., Simakov V.V. /Surface Modification of Polystyrene Thin Films by RF Plasma Treatment //BioNanoScience. – 2017. – V. 7. – Iss. 4 – pp 680-685.

***Д.А. Тимошенко, И.Д. Осыко, В.В. Симаков, И.В. Синёв***

Саратовский национальный исследовательский государственный университет  
имени Н.Г. Чернышевского

## **ЗОЛЬ-ГЕЛЬ МЕТОД ПОЛУЧЕНИЯ ГАЗОЧУВСТВИТЕЛЬНЫХ ПРИ КОМНАТНОЙ ТЕМПЕРАТУРЕ ПЛЕНОК ДИОКСИДА ОЛОВА**

Приведены результаты исследования морфологии и газочувствительных свойств пленок диоксида олова, полученных золь-гель методом. Показано, что полученные образцы обладают чувствительностью к парам этанола и воды при

комнатной температуре.

**Ключевые слова:** диоксид олова, газочувствительность, золь-гель метод.

## **SOL-GEL SYNTHESIS OF TIN DIOXIDE FILMS GAS-SENSITIVE AT ROOM TEMPERATURE**

The results of a study of the morphology and gas-sensitive properties of tin dioxide films obtained by a sol-gel method are presented. It is shown that the obtained samples have a sensitivity to ethanol and water vapor at room temperature.

**Keywords:** tin dioxide, gas sensitivity, sol-gel method.

### **Введение**

Газочувствительные сенсоры широко применяются в системах безопасности и управления технологическими процессами. Интерес вызывают методы снижения рабочей температуры сенсора, что позволит повысить автономность и надежность, а также расширить области использования таких систем. Основными направлениями в этой области являются модификация химического состава активных слоев, использования наноструктурированных пленок, уменьшение размера зерна, использование освещения в ультрафиолетовом диапазоне [1–3].

Из большого разнообразия методов получения газочувствительных слоев можно выделить золь-гель метод. Его особенностями являются низкая стоимость, возможность получать сетчатые структуры и изменять химический состав получаемых пленок в широком диапазоне [4].

### **Получение пленок диоксида олова**

Для синтеза слоев диоксида олова в качестве прекурсора использовалось олово двухлористое 2-водное. В процессе синтеза смешивались 2,5 г  $\text{SnCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$  (ч.д.а.) и 25 мл изопропилового спирта (ч.). Кислотность раствора регулировалась добавлением водного раствора аммиака и составляла  $\text{pH}=2$ . В течение 30 мин. с помощью магнитной мешалки производилось перемешивание раствора при температуре  $65\text{ }^\circ\text{C}$ . После окончания процесса перемешивания раствор созрел при комнатной температуре в течение 24 ч.

Нанесение пленок диоксида олова производилось на полированные пластины поликора, которые предварительно обезжиривались в перекисно-

аммиачном растворе при температуре 65 °С в течение 5 мин, а затем промывались дистиллированной водой. Нанесение пленки осуществлялось методом центрифугирования (4000 об/мин, 30 с). Полученные пленки диоксида олова отжигались при температуре 600 °С в течение 1 ч в потоке кислорода.

### **Микроструктура полученных пленок диоксида олова**

Микроструктура полученных пленок исследовалась с помощью сканирующего электронного микроскопа (рисунок 1). Из рисунка видно, что после отжига пленки имели мелкозернистую структуру, с размером зерен порядка 10 нм.

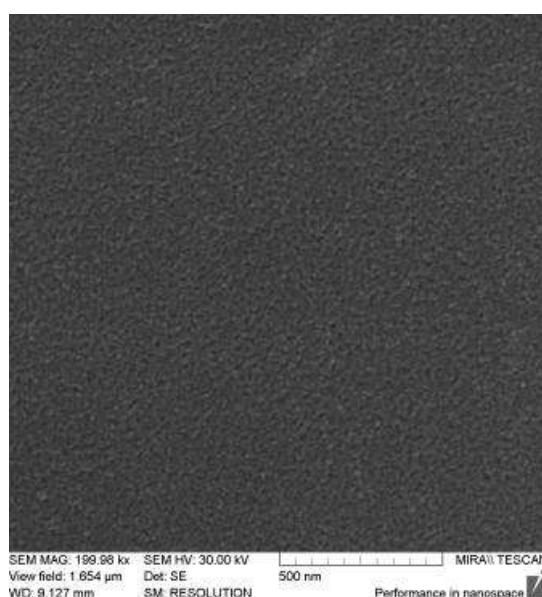


Рис.1. Микрофотография поверхности полученных пленок диоксида олова

### **Газочувствительность пленок диоксида олова**

Газочувствительность полученных пленок диоксида олова к парам воды и этанола при комнатной температуре исследовалась с помощью автоматизированного измерительного стенда [5]. Концентрация паров воды и этанола изменялась в диапазоне от 10 до 90% от концентрации насыщенного пара. Измерительный цикл составлял 20 мин., в течение которого 10 мин. происходил напуск пробы и в последующие 10 мин. - продувка измерительной камеры сухим воздухом.

Отклик сенсора  $S$  определялся как относительное изменение проводимости образца:

$$S = \frac{G_{\text{п}} - G_0}{G_0}, \quad (1)$$

где  $G_{\text{п}}$  – проводимость пленки диоксида олова в газовой пробе, См;  $G_0$  – проводимость в сухом воздухе, См.

На рисунке 2 представлена концентрационная зависимость отклика полученных пленок диоксида олова к парам этанола и воды.

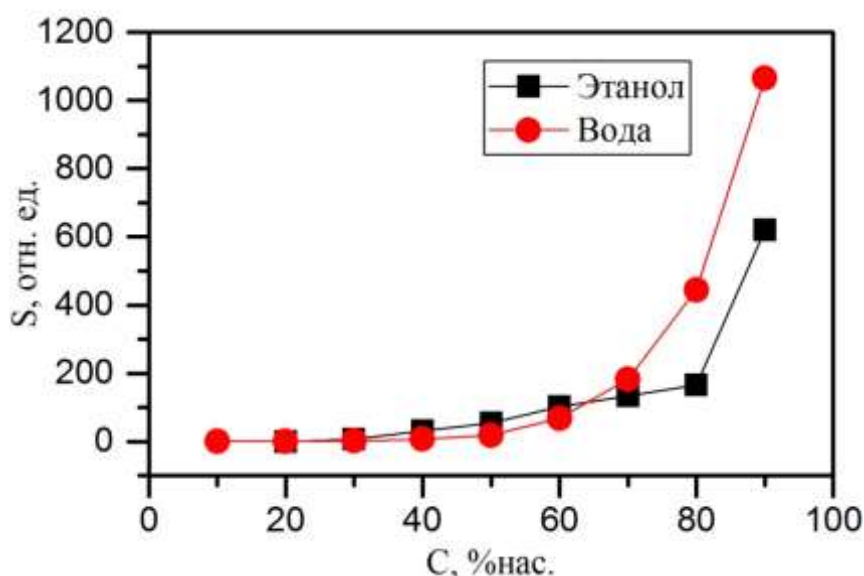


Рис.2. Зависимость отклика сенсора от концентрации паров этанола и воды, при температуре 33 °С

Из графиков видно, что полученные сенсоры имеют низкую чувствительность в области концентраций паров пробы менее 35 %нас. В области средних концентраций (40...70 %нас.) сенсоры чувствительны к парам воды и этанола, отклик составлял от 20 до 170 крат. В области высоких концентрация отклик сенсоров резко возрастал, и к парам этанола составлял порядка 600 крат, а к парам воды – 1100 крат.

*Список использованной литературы:*

1. Махди О. С., Маляр И. В., Захаревич А. М., Смирнов А. В., Синев И. В., Вениг С. Б. Фазовый состав тонких пленок оксида олова, газочувствительных при температуре, близкой к комнатной // Письма в ЖТФ. 2017. Вып. 14. С. 97-103.
2. Синев И. В., Смирнов А. В., Гребенников А. И., Сякина С. Д., Симаков В. В., Кисин В. В. Влияние предварительного нагрева на распознавательную способность мультисенсорной микросистемы // Журн. нано- и микросистемная техника. 2014. № 1. С. 52-55.
3. Осыко И. Д., Синев И. В., Гребенников А. И., Симаков В. В., Смирнов А. В. Влияние паров воды и освещения на проводимость тонких пленок диоксида олова при комнатной температуре // Физико-химические аспекты изучения кластеров, наноструктур и наноматериалов. 2017. С. 449-454.



4. Рембеза С. И., Белоусов С. А., Носов А. А., Меньшикова Т. Г. Электрофизические свойства металлооксидных пленок SnO<sub>2</sub>, изготовленных по золь-гель технологии // Вестник Воронежского государственного технического университета. 2016. Т. 12, № 2. С. 22-25.
5. Синев И. В., Симаков В. В., Никитина Л. В. Аппаратно-программный комплекс многопараметрического распознавания многокомпонентных газовых смесей на основе мультисенсорных микросистем // Башкирский химический журнал. 2010. Т. 17. № 5. С. 125-127.

***В.А. Федоренко, А.С. Богомолов***

Саратовский национальный исследовательский государственный университет  
имени Н.Г. Чернышевского

## **ОЦЕНКА УНИКАЛЬНОСТИ КОМПЛЕКСОВ ТРАСС, СОВПАДАЮЩИХ В СРАВНИВАЕМЫХ СЛЕДАХ НА ВЫСТРЕЛЕННЫХ ПУЛЯХ**

Получены численные условия обоснования категорических положительных выводов при идентификации оружия по вторичным следам на пулях. Данные условия отличаются от предлагаемых ранее другими авторами учетом количества имеющихся на пулях трасс и серий подряд совпадающих трасс. Это позволяет сформировать объективизированные рекомендации для поддержки принятия решений при формировании выводов о тождественности сравниваемых следов.

**Ключевые слова:** идентификация оружия, баллистика, след, пуля.

## **EVALUATION OF THE UNIQUENESS OF THE COMPLEXES OF THE TRACES COMPARING IN THE COMPARED TRACKS ON THE SHARPED BULLETS**

Numerical conditions for substantiating categorical positive conclusions in the identification of weapons by secondary traces on bullets are obtained. These conditions are different from those previously proposed by other authors, taking into account the number of tracks available on bullets and successive coincident runs. This makes it possible to form objectified recommendations to support decision making when drawing conclusions about the identity of the traces being compared.

**Keywords:** Identification of weapons, ballistics, track, bullet.

### **1 Описание проблематики и математическая модель**

Оценка уникальности наборов совмещенных трасс в следах на пулях опирается на практический опыт эксперта и, по сути, является его субъективным решением. Отсутствие методики такой оценки создает проблемы для объективного обоснования категорических положительных выводов о

тождественности сравниваемых следов и, соответственно, об оружии, из которого были выстрелены исследуемые пули. Следствием этого является проблема корректного формирования приоритетного списка по результатам автоматического поиска, проведенного баллистическими идентификационными системами.

Количественные условия для обоснования категорических положительных выводов о тождественности следов на сравниваемых пулях, были впервые предложены в [1, с. 35 – 49]. Суть метода заключается в подсчете числа серий с последовательно совпадающими при совмещении трассами и числа трасс в каждой серии. При этом не учитывается такой параметр, как число трасс в сравниваемых следах, что важно с точки зрения оценки вероятности данного события.

Поэтому актуальной задачей является разработка методики оценки числа совпадающих трасс в сравниваемых вторичных следах, необходимого для обоснования тождества сравниваемых следов с учетом количества трасс в них и серий совпадающих трасс.

В [2, с. 210 – 212] предлагается концепция вероятностного метода получения численных условий для обоснования категорических положительных выводов о тождественности сравниваемых следов по комплексам совпадающих трасс на выстреленных пулях. Наборы совпадающих трасс двух сравниваемых следов считаются уникальными, если вероятность их случайного совмещения с точки зрения комбинаторной вероятности не превосходит  $10^{-6}$  (известно, что количество экземпляров оружия одной модели редко превышает  $10^6$ ).

Для вычисления комбинаторной вероятности используется гипергеометрическая модель: каждый сравниваемый вторичный след на пуле представляется аналогом черного ящика, в котором располагаются шары с номерами, извлекаемые из ящичков. Оцениваются вероятности случайного совпадения  $n$  номеров без учета последовательности их выпадения (т.е. вероятность случайного совпадения  $n$  пар трасс, которые могут занимать

любую позицию в следе) и вероятность случайного совпадения серий из  $i$  последовательно следующих номеров при условии, что уже совпали  $n$  номеров (трасс). В этом случае вероятность  $P_n$  совпадения  $n$  или более трасс при наличии  $N_1, N_2$  трасс в следах на пулях 1 и 2 соответственно и максимально возможном числе трасс  $N$  в каждом следе определяется по комбинаторной формуле

$$P_{n+} = \sum_{i=n}^{\min\{N_1, N_2\}} \frac{C_{N_1}^i C_{N-N_1}^{N_2-i}}{C_N^{N_2}}. \quad (1)$$

В случае, когда имеется  $m$  серий из повторяющихся подряд трасс с числом элементов  $j_1, \dots, j_m$ , при условии, что  $n$  трасс, расположенных в произвольном порядке, уже совпало, вероятность случайного совпадения с учетом (1) будет иметь вид:

$$P_{n,m}(A) = \prod_{k=1}^m \frac{Q_m(n-j_k+1)}{C_n^{j_k}} \sum_{i=n}^{\min\{N_1, N_2\}} \frac{C_{N_1}^i C_{N-N_1}^{N_2-i}}{C_N^{N_2}}, \quad (3)$$

где  $Q_m$  – число возможных перестановок в каждой серии, а первое произведение в правой части формулы – произведение вероятностей выпадения каждой серии из совпадающих подряд трасс (формирование различных серий из совпадающих подряд трасс – независимые друг от друга события). Подразумевается, что между совпадающими подряд парами нет пустых мест (разрывов).

На основе данной концепции разработаны условия оценки уникальности комплексов трасс, совпадающих во вторичных следах на пулях с учетом серий совпадающих трасс.

## 2 Пример решения задачи

В качестве примера решения задачи приведем результаты численного эксперимента по определению порядков вероятности  $P_{n+}$  при максимально возможном числе трасс  $N=100$  и некоторых парах значений  $N_1, N_2$ . По итогам численного эксперимента составлена таблица значений числа  $n$  (внутренние клетки таблицы, выделены курсивом) совпадающих трасс, при достижении и

превышении которого вероятность случайного совпадения имеет порядок, указанный в заголовке столбцов, таблица 1.

Таблица 1 – Граничные значения числа совпадающих трасс для различных порядков вероятности случайного совпадения

$N_1$	$N_2$	Порядок $P(A_{n+})$				
		$10^{-2}$	$10^{-3}$	$10^{-4}$	$10^{-5}$	$10^{-6}$
<b>30</b>	<b>35</b>	14	17	18	20	21
<b>40</b>	<b>45</b>	22	25	27	28	30
<b>50</b>	<b>60</b>	34	37	39	40	42
<b>55</b>	<b>65</b>	40	43	44	46	47

Данная таблица может быть использована для определения числа совпадающих трасс, которое необходимо учитывать при заданном порядке вероятности случайного совпадения.

В качестве показателя степени уникальности наборов совпадающих трасс во вторичных следах на выстреленных пулях была введена величина  $T_n = |\lg(P_n)|$ ,  $T_{n,m} = |\lg(P_{n,m})|$ , которая растет с уменьшением вероятности случайного совпадения трасс. При использовании подобного подхода необходимо помнить, что уникальность наборов совпадающих трасс измеряется числами, большими 1, и считается достоверной, если соответствующий показатель равен 6 и более.

#### *Список использованной литературы*

1. *A. Biasotti. A Statistical Study of the Individual Characteristics of Fired Bullets // Journal Forensic Sciences. 1959. № 4(1). pp. 34-50.*
2. *Федоренко В.А., Мыльцина О.А. Концепция математической модели оценки уникальности наборов совпадающих трасс во вторичных следах на выстреленных пулях // Известия Саратовского университета. Новая серия. Серия: Экономика. Управление. Право. 2016. Т. 16. № 2. С. 209-213.*

## БИОМЕДИЦИНСКИЕ ТЕХНОЛОГИИ

*Е.И. Боровкова*<sup>1,2</sup>, *А.Р. Киселев*<sup>1,2,3</sup>, *Б.П. Безручко*<sup>1,2</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

<sup>3</sup>Саратовский государственный медицинский университет имени В.И. Разумовского

### СИНХРОНИЗАЦИЯ ХАОТИЧЕСКОГО ГЕНЕРАТОРА С ЗАПАЗДЫВАЮЩЕЙ ОБРАТНОЙ СВЯЗЬЮ В РАДИОФИЗИЧЕСКОМ ЭКСПЕРИМЕНТЕ МОДУЛИРОВАННЫМ ПО ЧАСТОТЕ СИГНАЛОМ

Апробация ряда известных методов определения границ интервалов синхронизации при анализе экспериментальных временных реализаций хаотического генератора с обратной запаздывающей связью, находящегося под воздействием линейно-частотно-модулированного гармонического сигнала при различных амплитудах внешнего воздействия продемонстрировала, что методы, основанные на анализе в скользящем окне коэффициента фазовой когерентности, расчете синхрограмм, построении вейвлет-спектров и анализе разности мгновенных фаз, полученной с помощью специализированной методики, основанной на вейвлет-преобразовании, дают близкие результаты при определении границ интервалов синхронизации.

**Ключевые слова:** хаотический генератор, система с запаздыванием, синхронизация, временные ряды, радиофизический эксперимент.

#### **Введение**

Типичным объектом для изучения работоспособности методов анализа сигналов систем реального мира являются радиофизические системы. С одной стороны, их исследование позволяет провести полноценный натурный эксперимент, а с другой стороны для радиофизических систем обычно удается построить из первых принципов хорошие математические модели и с высокой точностью задать их параметры. Таким образом, исследование временных рядов радиофизических генераторов занимает промежуточную сложность между численным исследованием эталонных моделей и нерукотворных натуральных объектов.

Целью работы являлось тестирование комплекса известных методов

определения границ интервалов синхронизации при анализе реализаций неавтономного радиофизического генератора, находящегося под воздействием линейно-частотно-модулированного гармонического сигнала.

### **Методы**

Были использованы следующие методы выявления фазового и частотного захвата [1]: построение диаграмм частотного захвата  $f_x(f_y)$  с помощью оценки в скользящих окнах спектров мощности; расчет в скользящих окнах численной меры синхронизованности  $\gamma$  – коэффициента фазовой когерентности; расчет и построение синхрограмм  $\psi$ ; анализ амплитудной динамики вейвлетных спектров мощности  $|W(s, t_0)|$ ; анализ разностей фаз  $\Delta\varphi$ , вводимых с помощью непрерывного вейвлетного преобразования вдоль временного масштаба воздействующего сигнала с линейно меняющейся частотой; анализ приращения разности фаз  $\Delta\theta$ , выделяемой с помощью Вейвлет преобразования на временном масштабе, соответствующем базовой частоте автономных колебаний исследуемой автоколебательной систем.

### **Гибридный генератор с запаздывающей обратной связью**

Работоспособность методов при анализе экспериментальных реализаций была продемонстрирована в ходе исследования синхронизации радиофизического неавтономного хаотического генератора с запаздывающей обратной связью, который используется, в частности, при построении систем скрытой передачи информации [2]. Структура генератора повторяет структуру элементов системы кровообращения - натуральных систем биологической природы, внешним линейно-частотно-модулированным гармоническим сигналом [3]:

$$RC\dot{x}(t) = -x(t) + F(x(t - \tau_0)) + y(t), \quad (1)$$

где  $x(t)$  и  $x(t - \tau_0)$  - напряжения на входе и выходе линии задержки, соответственно,  $\tau_0$  - время запаздывания,  $R$  и  $C$  - сопротивление и емкость элементов фильтра,  $F$  - квадратичная передаточная характеристика нелинейного элемента.

Блок-схема экспериментальной установки представлена на рисунке 1.

Параметры генератора с запаздывающей обратной связью, используемые для генерации реализаций:  $RC=0.46$  мс,  $\varepsilon_0=0.46$  мс,  $\tau_0=1.57$  мс. Хаотический генератор в автономном режиме демонстрировал хаотические колебания с выраженной основной частотой 270 Гц и высоким шумовым пьедесталом, на фоне которого выделяются вторая и третья гармоники основной частоты. После цифро-аналогового преобразователя и перед входом на фильтр низких частот был введен внешний сигнал  $y(t)$ . Внешнее воздействие изменялось по закону  $y(t) = A \sin(2\pi w_L(t)t)$ , где  $A$  - амплитуда внешнего воздействия,  $w_L(t) = w_0 \cdot 10^{x_w(t)/2}$  - частота внешнего сигнала,  $w_0 = 220$  Гц и управляющее напряжение  $x_w(t)$  изменяется линейно от 0 до 1.6 В в течение 0.8 секунд, обеспечивая изменение  $w_L(t)$  от 220 до 1000 Гц. Проведено четыре эксперимента с различной амплитудой внешнего воздействия сигнала  $y(t)$ :  $A = 0.5$ ,  $A = 1.0$ ,  $A = 1.5$ ,  $A = 2.0$  В.

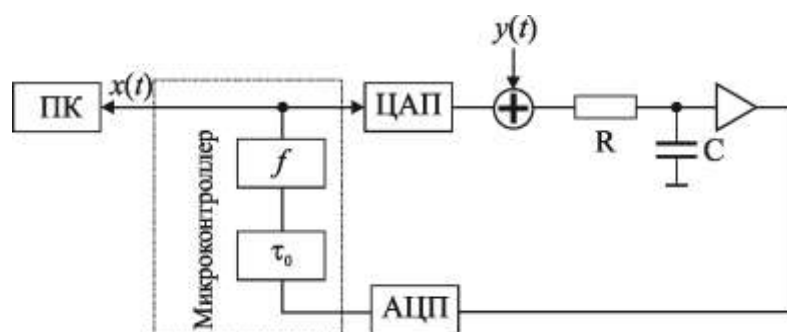


Рис. 1. (а) - блок-схема радиофизической экспериментальной установки: гибридный хаотический генератор с запаздывающей обратной связью с квадратичной нелинейностью под воздействием внешнего линейно-частотно-модулированного сигнала  $y(t)$ . Линия задержки и нелинейный элемент генератора реализованы в цифровом виде на базе микроконтроллера, сигнал с выхода нелинейного элемента подавался на вход цифро-аналогового преобразователя, проходил через инерционный элемент, представляющий собой RC-фильтр нижних частот, оцифровывался с помощью встроенного аналого-цифрового преобразователя и подавался в цифровом виде на вход линии задержки, представляющей собой кольцевой буфер в оперативной памяти микроконтроллера

Участок временной реализации напряжения на выходе генератора с запаздывающей обратной связью, возбуждаемого внешним сигналом с частотой, изменяющейся по нелинейному закону для амплитуды внешнего

воздействия 2.0 В и его Фурье спектр мощности представлен на рисунке 2.

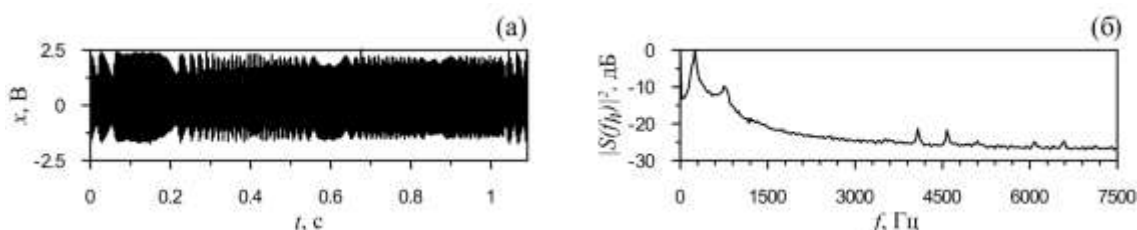


Рис. 2. (а) - участок временного ряда на выходе радиотехнического генератора с запаздывающей обратной связью (сплошная линия), возбуждаемого внешним сигналом  $y(t)$  с амплитудами 2.0 В (пунктирная линия). (б) – его Фурье спектр мощности

### **Результаты**

Для тестируемых значений амплитуд внешнего воздействия диагностировались границы и длительности интервалов синхронизации. Было показано, что все используемые методы позволяют диагностировать интервалы синхронизации порядка 1:1 автоколебаний генератора внешним сигналом и идентифицировать их границы. Разброс оценок границ интервала, полученный с помощью различных методов, не превышает 0.001 с. Пример определения границ интервалов синхронизации генератора с запаздывающей обратной связью при амплитуде внешнего воздействия 2.0 В представлен на рисунке 3.

Рисунки 3а,б демонстрируют классическую картину частотного захвата неавтономного автогенератора при изменении частоты внешнего воздействия в интервале частот от 200-1000 Гц (за временной интервал 1,1 с). Диагностика фазовой синхронизации разнородными методами с использованием различных методов определения мгновенных фаз колебаний позволяет идентифицировать интервал синхронизации 0.013-0.045 с (рис. 3в-е). Наиболее удобным для определения границ интервалов синхронизации оказывается метод оценки в окнах коэффициента фазовой когерентности (рис. 3в), который демонстрирует крутые фронты при входе и выходе из синхронного режима, пересекая критический уровень.

На рисунке 3 - Амплитуда внешнего воздействия 2.0 В, за время эксперимента частота внешнего сигнала изменяется от 200 Гц до 1000 Гц. (а) - диаграмма частотного захвата. Значения основной частоты колебаний



генератора с запаздывающей обратной связью, лежащие вблизи мгновенной частоты внешнего сигнала (пунктирная линия), соответствуют синхронному поведению; (б) - вейвлет-спектр Морле, пунктир - частота внешнего воздействия; (в) - значения коэффициента фазовой когерентности, рассчитанного в скользящих окнах длительностью 10 характерных периодов. Горизонтальная пунктирная линия отмечает полный 95%-й уровень значимости, рассчитанный при проверке нулевой гипотезы о несвязанных системах. Значения, превышающие эту линию, с вероятностью 0.95 указывают на наличие значимой синхронизации; (г) - динамика разности фаз на временных масштабах, соответствующих частоте воздействующего сигнала. Участок линейного падения разности фаз на  $\pi$  указывает на фазовую синхронизацию; (д) - синхрограмма; (е) - динамика приращения фаз на постоянном масштабе, соответствующей собственной частоте автогенератора 220 Гц. Участок линейного падения приращения фаз на величину  $\Delta\theta_0$  указывает на фазовую синхронизацию.

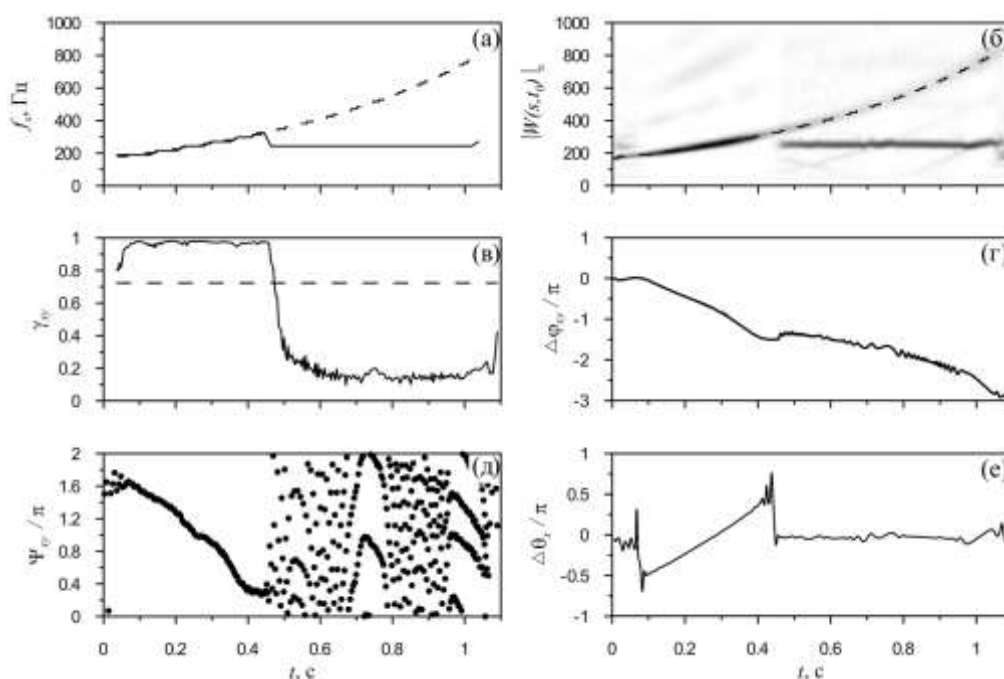


Рис. 3. Результаты определения границ интервалов синхронизации в ходе обработки временных рядов колебаний напряжения на выходе генератора с запаздывающей обратной связью, находящегося под воздействием внешнего сигнала с периодом, линейно уменьшающимся во времени.

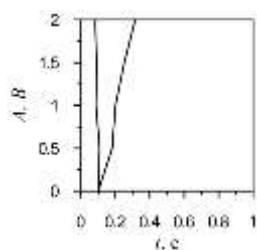


Рис. 4. Границы клюва синхронизации, измеренные в ходе обработки временных рядов колебаний напряжения на выходе ГЗОС, возбуждаемого внешним сигналом с частотой, изменяющейся по нелинейному закону для амплитуд внешнего воздействия 0.5 В, 1 В, 1.5 В и 2.0 В.

Для различных амплитуд внешнего воздействия показано, что все методы позволяют отчетливо диагностировать режимы синхронизации 1:1 автоколебаний генератора внешним сигналом и количественно определить их границы. Все используемые методы анализа продемонстрировали близкие результаты. На рисунке 4 представлен клюв синхронизации исследуемого генератора для тестируемых амплитуд воздействующего сигнала. Все методы демонстрируют, что с ростом амплитуды внешнего воздействия область частотной синхронизации расширяется, что соответствует известному эффекту расширения области синхронизации автоколебаний с увеличением интенсивности воздействия.

### **Заключение**

Методы диагностики фазовой синхронизации применены к временным рядам колебаний напряжения на выходе неавтономного генератора с запаздывающей обратной связью, находящегося под воздействием сигнала с линейно изменяющейся частотой. Для различных амплитуд внешнего воздействия показано, что все методы позволяют диагностировать режимы синхронизации 1:1 автоколебаний генератора внешним сигналом и количественно определить их границы. Границы интервалов фазовой синхронизации 1:1, идентифицируемые с помощью всех методов, близки. Полученные результаты имеют значение для развития методов диагностики синхронизации по нестационарным данным, в частности, при анализе сигналов биологической природы [4, 5].

*Работа выполнена при поддержке грант Президента Российской*

*Список использованной литературы:*

1. Боровкова Е.И., Караваев А.С., Пономаренко В.И., Прохоров М.Д., Безручко Б.П. Диагностика частотного захвата в условиях внешнего воздействия сигналом переменной частоты // Известия Российской академии наук. Серия физическая. 2011. Т. 75. № 12. С. 1704.
2. Ponomarenko V.I., Prokhorov M.D., Karavaev A.S., Kulminskiy D.D. An experimental digital communication scheme based on chaotic time-delay system // Nonlinear Dynamics. 2013. Т. 74. № 4. С. 1013-1020.
3. Безручко Б.П., Гриднев В.И., Караваев А.С., Киселев А.Р., Пономаренко В.И., Прохоров М.Д., Рубан Е.И. Методика исследования синхронизации колебательных процессов с частотой 0.1 Гц в сердечно-сосудистой системе человека // Известия высших учебных заведений. Прикладная нелинейная динамика. 2009. Т. 17. № 6. С. 44-56.
4. Kiselev A.R., Gridnev V.I., Posnenkova O.M., Prokhorov M.D., Karavaev A.S., Ponomarenko V.I., Bezruchko B.P. Effects of antihypertensive treatment on cardiovascular autonomic control: a prospective study // Anadolu Kardiyoloji Dergisi. 2014. V. 14. No. 8. P. 701-710.
5. Kiselev A.R., Karavaev A.S., Gridnev V.I., Prokhorov M.D., Ponomarenko V.I., Borovkova E.I., Shvartz V.A., Ishbulatov Yu.M., Posnenkova O.M., Bezruchko B.P. Method of estimation of synchronization strength between low-frequency oscillations in heart rate variability and photoplethysmographic waveform variability // Russian Open Medical Journal. 2016. V. 5. No. 1. P. 0101.

*Ю.М. Ишбулатов<sup>1,2</sup>, Б.П. Безручко<sup>1,2</sup>*

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

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

**МОДЕЛЬ СЕРДЕЧНО-СОСУДИСТОЙ СИСТЕМЫ ЧЕЛОВЕКА С  
АВТОНОМНЫМ КОНТУРОМ РЕГУЛЯЦИИ СРЕДНЕГО  
АРТЕРИАЛЬНОГО ДАВЛЕНИЯ**

Предложена из первых принципов математическая модель сердечно-сосудистой системы. В ходе сопоставления статистических характеристик и спектральных свойств показано, что предложенная модель благодаря введению контура регуляции среднего артериального давления в виде автогенератора с запаздыванием демонстрирует лучшее соответствие экспериментальным данным, чем известная модель.

**Ключевые слова:** математическая модель, сердечно-сосудистая система, спектральный анализ, автогенератор с запаздыванием.

Исследования сложных многокомпонентных систем реального мира, как правило, сопровождаются последовательным совершенствованием модельных представлений, с позиций которых рассматривается объект. Стартуя от менее

сложных структурных схем, которые описывают поведение реальной системы только на качественном уровне, по мере получения новых знаний, модели развиваются, усложняются, формализуются в виде систем уравнений, претендуя не только на качественное, но и на количественное описание наблюдаемых явлений. Зачастую количественные оценки с использованием таких моделей заставляют пересматривать стартовые качественные представления и схемы. Особое значение моделирование имеет в физиологии, биологии и медицине, где возможности экспериментальных инвазивных исследований и диапазон допустимых воздействий на объект исследования принципиально ограничены. Одной из важных задач является моделирование сердечно-сосудистой системы (ССС) человека.

Системы биологической природы отличаются сложностью и нестационарностью. Для них характерна сетевая структура, включающая целый ряд взаимодействующих элементов. Поэтому, в настоящее время известно лишь несколько математических моделей ССС, подробно учитывающих работу контуров автономной регуляции. Однако необходимость моделирования большого числа взаимодействующих функциональных элементов в перечисленных работах приводит к упрощению и линеаризации модельных представлений таких элементов. В частности, система барорефлекторной регуляции артериального давления (БРАД) во всех перечисленных работах моделируется линейным дифференциальным уравнением первого порядка с запаздыванием. Такие модели регуляции артериального давления (АД) не способны демонстрировать устойчивые автоколебания. В них возможны только режимы вынужденных автоколебаний под действием шумов и в связи с влиянием других элементов системы, воздействующих на них.

На основании результатов натурных экспериментов целый ряд исследователей указывает на автономный и автоколебательный характер системы БРАД. Было показано, что данная система у человека способна действовать автономно и демонстрирует устойчивые автоколебания с характерным периодом около 10 секунд. В наших экспериментальных

исследованиях также наблюдалась синхронизацией ритмов систем регуляции вынужденным дыханием.

Представлена модель ССС, которая учитывает нелинейные свойства системы БРАД. Возможности модели изучаются в ходе сопоставления результатов статистического и спектрального анализа variability сердечного ритма (ВСР) с экспериментальными данными, а также реализациями известной модели К. Kotani, которая отличается наиболее подробным учетом особенностей динамики систем регуляции ССС. Также в экспериментах и по сигналам сопоставляемых моделей исследуется фазовая синхронизация 0,1 Гц ритмов сигнала системы БРАД дыханием с линейно изменяющейся частотой. Результаты работы подробно представлены в статье [1].

Предложенная математическая модель описывает следующие процессы: основной сердечный ритм, влияния отделов автономной нервной системы на частоту сердечных сокращений (ЧСС) и их силу, БРАД, процесс формирования АД в фазы систолы и диастолы, учитывает влияние на перечисленные процессы дыхания. Структура модели представлена на рисунке 1.

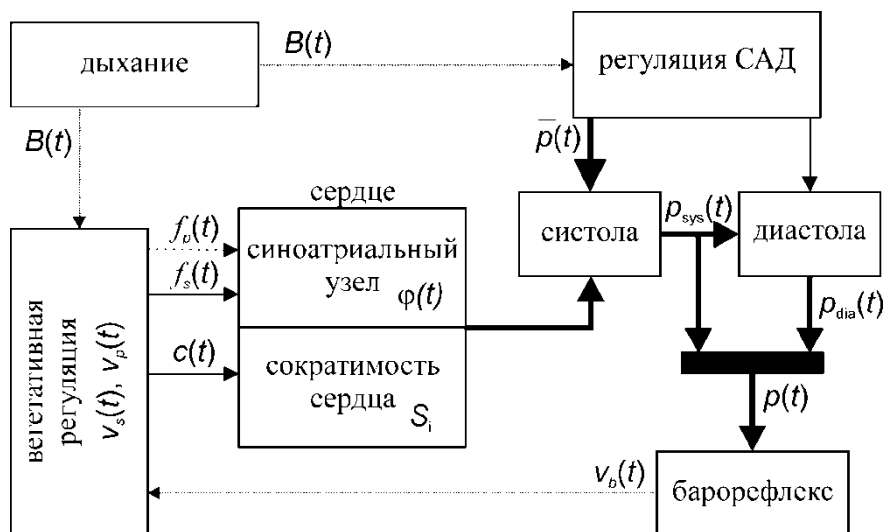


Рис. 1. Структурная схема предложенной модели. Влияние вагуса отмечено пунктиром, симпатическая активность – сплошной линией, АД – жирной линией, прочие влияния – точечной линией.

При исследовании возможностей и границ применимости предложенной модели мы сопоставляли ее с моделью Kottani с оригинальными параметрами

(для краткости будем называть ее в тексте работы “модель К”) и параметрами, модифицированными нами (“модель КМ”), а также предложенной нами модели (“модель М”). Модель К была модифицирована нами для приближения спектральной плотности мощности к виду, характерному для экспериментальных данных.

Учет в модели М автоколебательного характера контура регуляции тонуса артериальных сосудов позволил легко настроить мощности спектральных составляющих, приведя их в хорошее соответствие с экспериментальными результатами. Это подтверждает расчет распространенных медицинских индексов: LF – средняя спектральная мощность ВСР, рассчитанная в полосе 0,04-0,15 Гц, HF – средняя спектральная мощность ВСР, рассчитанная в полосе 0,15-0,4 Гц, LF/HF – отношение этих индексов,  $LF_{norm}$  и  $HF_{norm}$  – отношение индексов LF и HF, соответственно, к мощности, усредненной в полосе 0,04-0,4 Гц, а также расчет среднего ЧСС (HR).

Экспериментальные значения индексов рассчитывались по сигналам ВСР 10 здоровых мужчин в возрасте 20-25 лет в состоянии покоя. Индексы сопоставлялись с результатами статистического анализа сигналов ВСР моделей. Для этого от каждой модели был получен ансамбль из 10 реализаций, длительность каждой была эквивалентна 10 минутной экспериментальной записи. Сопоставление показало, что индексы, рассчитанные по сигналам ВСР модели М оказываются значительно ближе к экспериментальным, чем для моделей К и КМ.

В предыдущих работах нами было показано, что регуляторные системы, имеющие характерную частоту около 0,1 Гц, синхронизируются с сигналом вынужденного дыхания с линейно изменяющейся частотой, демонстрируя поведение, характерное для радиофизических автогенераторов. Учет в модели М автоколебательного характера системы БРАД позволили воспроизвести данный эффект. Для диагностики синхронизации использовался подход, основанный на выделении мгновенных фаз колебаний с помощью непрерывного вейвлет-преобразования.

В наших экспериментальных исследованиях испытуемые, не имеющие патологий ССС, производили по звуковому сигналу линейно меняющейся частоты вдохи. Частота сигнала менялась от 0,05 до 0,25 Гц в течение 30 минут [2]. В ходе эксперимента одновременно регистрировались сигнал дыхания (назальным термическим датчиком) и ЭКГ. Из ЭКГ выделялся для анализа сигнал ВСР. В ходе эксперимента испытуемый находился в сидячем положении с закрытыми глазами в тихой затемненной комнате. Важность исследования синхронизации в ССС показана в работах [3, 4].

На рисунке 2 представлена типичная разность фаз одного из натуральных экспериментов и сигналов моделей, находящихся под воздействием дыхания с линейно нарастающей частотой. Из рисунка 3 видно, что линейный участок разности фаз изменяется на  $\pi$ , уверенно демонстрируя полосу фазового захвата, только для экспериментальной разности фаз и разности фаз модели М. Причем интервалы захвата фаз для модели М и экспериментального сигнала хорошо соответствуют друг другу. Разность фаз моделей К и КМ не демонстрируют линейного изменения на  $\pi$ . Т.е. фазовая синхронизация в этой модели не наблюдается. Наблюдается лишь эффект просачивания.

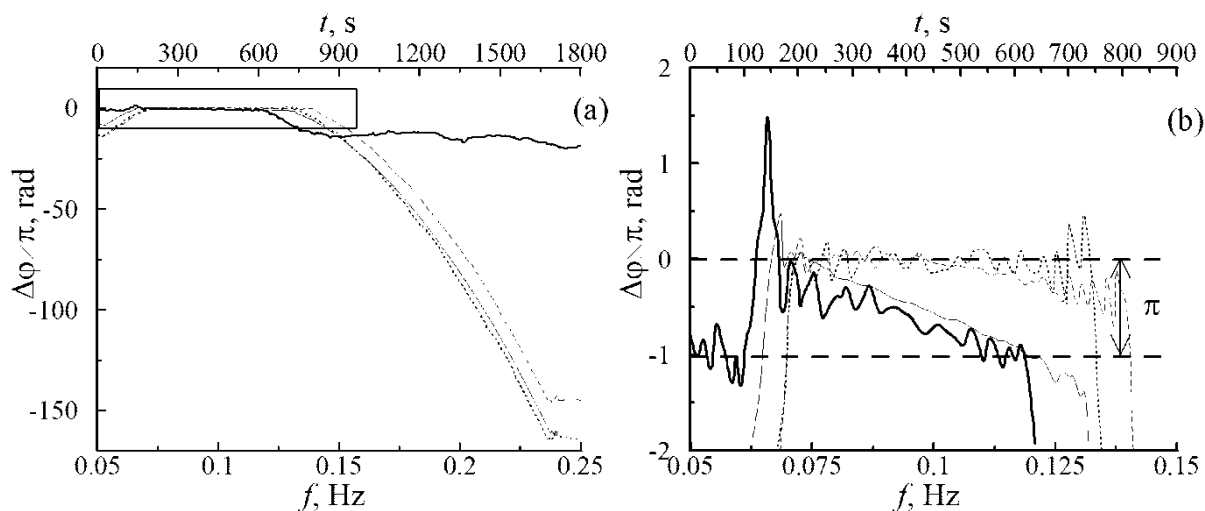


Рис. 2 (а). Разности мгновенных фаз колебаний сигнала внешнего воздействия  $B(t)$  с линейно нарастающей частотой  $f_r$ , (б) увеличенный фрагмент разности фаз в области фазовой синхронизации внешним сигналом экспериментальной реализации.

В работе была предложена модель сердечно-сосудистой системы человека. Ее возможности и границы применимости сопоставлялись с результатами

анализа экспериментальных сигналов и временных реализаций модели, предложенной К. Kotani. В ходе сопоставления осуществлялся спектральный и статистический анализ сигналов ВСР, а также диагностировался захват мгновенных частот колебаний 0,1 Гц ритма кардиоинтервалограммы в экспериментах с линейно изменяющейся частотой вынужденного дыхания.

В ходе исследования было показано, что введение в предложенную нами модель контура барорефлекторной регуляции среднего артериального давления в виде автогенератора с запаздыванием (что соответствует современным физиологическим представлениям), которые широко распространены в природе и технике [5], позволило лучше, чем в оригинальной и модифицированной моделях, воспроизвести спектры мощности, значения статистических индексов ВСР и соотношение систолического и диастолического АД, типичные для здоровых испытуемых в покое. Также предложенная нами модель продемонстрировала возможность воспроизведения эффекта синхронизации 0,1 Гц ритма системы БРСАД дыханием с линейно меняющейся частотой, который ранее был показан в наших экспериментальных исследованиях.

*Работа выполнена при поддержке гранта РФФ №14-12-00291.*

#### *Список использованной литературы*

1. Караваев А.С., Ишбулатов Ю.М., Пономаренко В.И., Прохоров М.Д., Киселев А.Р., Безручко Б.П. Модель сердечно-сосудистой системы человека с автономным контуром регуляции среднего артериального давления // Физиология человека. 2017. Т. 43. № 1. С. 70-80.
2. Безручко Б.П., Гриднев В.И., Караваев А.С., Киселев А.Р., Пономаренко В.И., Прохоров М.Д., Рубан Е.И. Методика исследования синхронизации колебательных процессов с частотой 0.1 Гц в сердечно-сосудистой системе человека // Известия высших учебных заведений. Прикладная нелинейная динамика. 2009. Т. 17. № 6. С. 44-56.
3. Kiselev A.R., Karavaev A.S., Gridnev V.I., Prokhorov M.D., Ponomarenko V.I., Borovkova E.I., Shvartz V.A., Ishbulatov Yu.M., Posnenkova O.M., Bezruchko B.P. Method of estimation of synchronization strength between low-frequency oscillations in heart rate variability and photoplethysmographic waveform variability // Russian Open Medical Journal. 2016. V. 5. No. 1. P. 0101.
4. Киселев А.Р., Гриднев В.И., Караваев А.С., Посненкова О.М., Пономаренко В.И., Прохоров М.Д., Безручко Б.П. Сравнительная оценка влияния фозиноприла и ателолола на синхронизацию колебаний с частотой около 0,1 Гц в ритме сердца и микроциркуляции крови у больных артериальной гипертензией // Рациональная фармакотерапия в кардиологии. 2010. Т. 6. № 6. С. 803-811.
5. Ponomarenko V.I., Prokhorov M.D., Karavaev A.S., Kulminskiy D.D. An experimental digital communication scheme based on chaotic time-delay system // Nonlinear Dynamics. 2013. Т. 74. № 4. С. 1013-1020.



*Д.Д. Кульминский<sup>1,2</sup>, А.Р. Киселев<sup>1,2,3</sup>, Б.П. Безручко<sup>1,2</sup>*

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

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

<sup>3</sup>Саратовский государственный медицинский университет имени В.И. Разумовского

## **УСТРОЙСТВО ДЛЯ ОЦЕНКИ ФУНКЦИОНАЛЬНОГО СОСТОЯНИЯ СЕРДЕЧНО-СОСУДИСТОЙ СИСТЕМЫ НА ОСНОВЕ КОНТРОЛЯ СИНХРОНИЗАЦИИ ЕЕ РИТМОВ**

В статье приведены основные результаты разработки и создания коллективом авторов устройства для диагностики состояния сердечно-сосудистой системы на основе анализа регуляторных ритмов с собственной частотой около 0.1 Гц.

**Ключевые слова:** Сердечно-сосудистая система, фотоплетизмограмма, синхронизация

Данная статья посвящена основным результатам многолетней научно-исследовательской разработке коллектива авторов портативного устройства для оценки степени синхронизации регуляторных ритмов сердечно-сосудистой системы с частотой колебаний около 0.1 Гц. Детальное описание предложенного нами метода и созданного нами устройства приведено в работе [1]. Статья является обобщением научных результатов полученных в ходе исследований. Мотивом для исследования стало понимание того, что здоровье человека определяется не только состоянием отдельных органов и систем организма, но и качеством их функционального взаимодействия. Было показано, что у здоровых людей основные ритмы сердечно-сосудистой системы, а именно, главный сердечный ритм, дыхание и низкочастотные колебания сердечных сокращений и кровяного давления с собственной частотой порядка 0.1 Гц, находятся в состоянии достаточно высокой степени синхронизации между собой, демонстрируя поведение, характерное для радиофизических генераторов [2], что обеспечивает хорошую адаптацию организма [3]. Однако такая синхронизация может быть нарушена при развитии патологических процессов в сердечно-сосудистой системе, возникающих, например, при остром инфаркте миокарда, при котором происходит

разрушение нормальных функциональных взаимосвязей между различными подсистемами регуляции сердечно-сосудистой системы [4]. Информация о степени синхронизованности ритмов сердечно-сосудистой системы оказывается важным критерием при диагностике ее состояния и ее следует учитывать при контроле эффективности лечения после перенесенного инфаркта миокарда в дополнение к традиционным методам диагностики [5].

Для оценки синхронизации между НЧ колебаниями сердечно-сосудистой системы был предложен следующий способ. Сигналы электрокардиограммы (ЭКГ) и фотоплетизмограммы (ФПГ) со среднего пальца испытуемого одновременно регистрировались при спонтанном дыхании. Сигнал оцифровывались с частотой дискретизации 250 Гц и разрядностью 14 бит. Длительность каждой записи в нашем эксперименте была 10 минут. Для выделения НЧ компонент последовательности RR интервалов и сигнала ФПГ использовался полосовой фильтр (0.05-0.15 Гц). С помощью преобразования Гильберта были введены фазы  $\phi_1$  и  $\phi_2$  этих компонент, а также рассчитана их разность  $\varphi = \phi_1 - \phi_2$ . Наличие фазовой синхронизации определяется условием  $|\varphi| < \text{const}$ . В этом случае разность фаз  $\varphi(t)$  колеблется около постоянного значения. Регистрировались участки синхронизации – области, где  $\varphi$  колеблется во времени около постоянного значения, считалась общая длительность  $S$ , и выражалось в процентах от общей длительности записи  $T$ : 
$$S = \left( \sum_{k=1}^N d_k / T \right) \times 100\%$$
, где  $d_k$  длительность  $k$ -ого участка синхронизации и  $N$  общее число участков. Индекс  $S$  определял относительное время синхронизации между рассматриваемыми 0.1-Гц ритмами. Для автоматизации метода поиска участков с фазовой синхронизацией был разработан алгоритм на основе линейной аппроксимации мгновенной разницы фаз  $\varphi(t)$  в скользящем окне.

Переход от анализа коротких реализаций к анализу данных, полученных в ходе суточного наблюдения, дал качественно новую информацию о степени взаимодействия подсистем сердечно-сосудистой системы. Для расширения возможностей диагностики был разработано компактное, автономное, носимое

на теле устройства, осуществляющего суточный анализ синхронизованности ритмов.

В ходе проведенных исследований оказалось, что удастся отказаться от одновременной регистрации ЭКГ и ФПГ и ограничиться регистрацией единственного сигнала ФПГ, из которого с помощью специальной процедуры выделяются ритмы исследуемых систем. Для этого вместо последовательности RR интервалов, выделяемой из ЭКГ, выделялась из ФПГ последовательность интервалов времени между двумя последовательными основными пиками.

Было разработано компактное носимое устройство с автономным питанием для суточной записи сигнала ФПГ. Устройство включало следующие основные элементы: активный пальцевой датчик ФПГ с цифровым выходом, органы управления и индикации, канал связи с персональным компьютером, работающий на скорости 2 Мбит/с, энергонезависимую флеш-память, а также микроконтроллер, управляющий работой всех элементов устройства.

Анализ синхронизации исследуемых процессов на базе микроконтроллера потребовал модификации используемых алгоритмов обработки сигналов. В частности, для фильтрации сигналов был использован нерекурсивный цифровой фильтр с конечной импульсной характеристикой, с полосой пропускания 0.06-0.14 Гц.

Разработанный нами метод оценки синхронизации регуляторных ритмов сердечно-сосудистой системы оказывается полезным для диагностики ее состояния. Он позволяет оценивать вероятность выживания пациентов, перенесших острый инфаркт миокарда, и помогает в выборе и корректировке медикаментозной терапии при лечении таких пациентов. Установлено, что диагностику синхронизации низкочастотных колебаний сердечного ритма и кровяного давления можно проводить по унивариантным данным, представляющим собой запись сигнала ФПГ.

Разработан экспериментальный образец автономного, носимого на теле устройства для суточной регистрации сигнала ФПГ и создано программное обеспечение для оценки по этому сигналу показателя синхронизации 0.1-Гц

колебаний сердечного ритма и кровяного давления. Изучена возможность диагностики синхронизации исследуемых ритмов в реальном времени.

*Работа выполнена при поддержке гранта Президента Российской Федерации МД-3318.2017.7 (регистрация биомедицинских данных, интерпретация результатов с точки зрения кардиологии), РФФ №14-12-00291 (радиофизическая модель, нелинейные методы анализа данных).*

*Список использованной литературы*

1. Кульминский Д.Д., Боровкова Е.И., Хорев В.С., Миронов С.А. Разработка устройства суточного мониторинга состояния сердечно-сосудистой системы на основе анализа синхронизации ее ритмов // Бюллетень медицинских Интернет-конференций. 2014. Т.4. N.7. С.962–966.
2. Ponomarenko V.I., Prokhorov M.D., Karavaev A.S., Kulminskiy D.D. An experimental digital communication scheme based on chaotic time-delay system // Nonlinear Dynamics. 2013. Т. 74. № 4. С. 1013-1020.
3. Безручко Б.П., Гриднев В.И., Караваев А.С., Киселев А.Р., Пономаренко В.И., Прохоров М.Д., Рубан Е.И. Методика исследования синхронизации колебательных процессов с частотой 0.1 Гц в сердечно-сосудистой системе человека // Известия высших учебных заведений. Прикладная нелинейная динамика. 2009. Т. 17. № 6. С. 44-56.
4. Kiselev A.R., Gridnev V.I., Posnenkova O.M., Prokhorov M.D., Karavaev A.S., Ponomarenko V.I., Bezruchko B.P. Effects of antihypertensive treatment on cardiovascular autonomic control: a prospective study // Anadolu Kardiyoloji Dergisi. 2014. V. 14. No. 8. P. 701-710.
5. Kiselev A.R., Karavaev A.S., Gridnev V.I., Prokhorov M.D., Ponomarenko V.I., Borovkova E.I., Shvartz V.A., Ishbulatov Yu.M., Posnenkova O.M., Bezruchko B.P. Method of estimation of synchronization strength between low-frequency oscillations in heart rate variability and photoplethysmographic waveform variability // Russian Open Medical Journal. 2016. V. 5. No. 1. P. 0101.

***К.А. Садчикова, С.Ю. Добдин, И.Э. Рабичев***

Саратовский национальный исследовательский государственный университет имени Н.Г. Чернышевского

**ИССЛЕДОВАНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК ЖИДКОКРИСТАЛЛИЧЕСКИХ СТЕКОЛ, ПРИМЕНЯЕМЫХ В ОФТАЛЬМОЛОГИИ**

В данной статье представлены результаты исследования электрооптических свойств жидких кристаллов, применяемых в офтальмологии. В ходе эксперимента был установлен ряд образцов, соответствующих всем техническим требованиям для лечения глазных заболеваний. Показано, что жидкие кристаллы могут быть использованы для анализа зрительной системы и для воздействия на зрительную систему, для развития зрительно-моторных

реакций с целью лечения различных форм косоглазия и повышения остроты зрения при амблиопии, гиперметропии и миопии.

**Ключевые слова:** жидкокристаллические стекла (ЖКС), лечение глазных заболеваний, анализ зрительной системы, диапазон интервалов включения ЖКС, пропускание света.

Биомедицинское применение ЖК находит в настоящее время все большее признание [1]. Одним из интересных и полезных применений ЖК является создание стереоскопических систем на жидких кристаллах, полезных для людей, страдающих нарушением зрения. Действительно, идея стереотелевидения на ЖК может быть реализована за счет модификации передающей телекамеры и дополнением телевизионных приемников специальными очками, стекла которых представляют собой систему с ЖК–фильтрами. Важным применением жидкокристаллических стекол может быть создание специализированных очков для лечения различных видов функциональных нарушений зрения, таких как нистагм, косоглазие, миопия [2].

В частности, для развития мышечного баланса используется методика лечения, включающая переменное световое воздействие на каждый глаз с интервалом переключения от 5000 до 150 мс; для развития бинокулярной фиксации используется интервал переключения от 250 до 20 мс; для повышения остроты зрения используется интервал переключения от 700 до 120 мс [3-5].

Целью настоящей работы является исследование характеристик жидкокристаллических стекол, применяемых в офтальмологии.

Экспериментальные исследования проводились на 3-х образцах с целью возможности их использования для лечения глазных болезней. Устройство предназначено для анализа зрительной системы и для воздействия на зрительную систему, для развития зрительно-моторных реакций с целью лечения различных форм косоглазия и повышения остроты зрения при амблиопии, гиперметропии и миопии. Первый образец - Samsung active glasses ssg-3050gb, второй образец - Smart Switchable Glass SW-02, третий образец - Smart Glass ТК.

Экспериментальная установка по исследованию электрооптических свойств в жидких кристаллах состоит из осциллографа, NI Elvis, как источника внешнего переменного напряжения, исследуемых образцов, красного светодиода в качестве источника излучения, фотодиода ФД-24К в качестве фотоприемника прошедшего через образец излучения (рис.1).

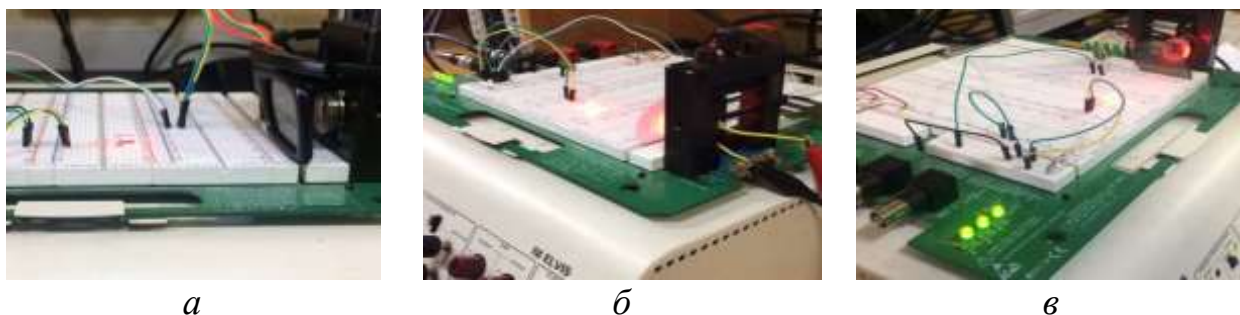


Рис.1. Экспериментальная установка: *а* - Samsung active glasses ssg-3050gb, *б* - Smart Switchable Glass SW-02, *в* - Smart Glass ТК.

Исследование электрооптических свойств образца **Samsung active glasses ssg-3050gb**. Была зарегистрирована зависимость оптического пропускания жидкокристаллического стекла от напряжения в 8 В (рабочее напряжение по техническим характеристикам устройства) при разных частотах питающего напряжения от 1-1000 Гц с шагом в 50 Гц (рис.2).

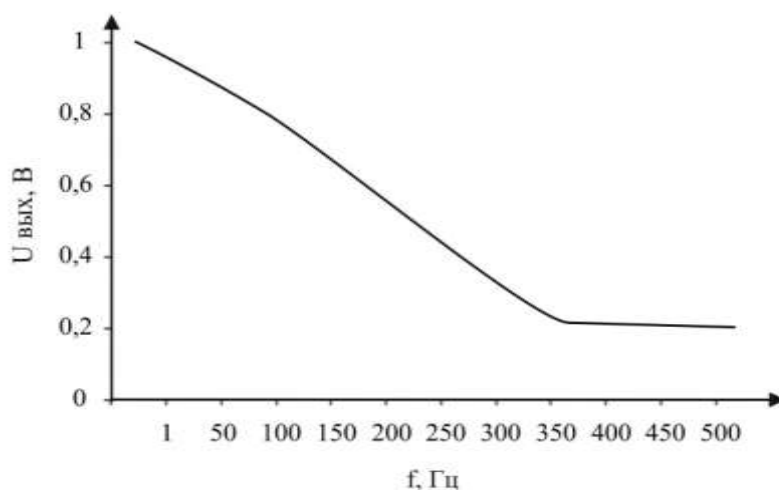


Рис.2 Зависимость выходного напряжения ( $U_{\text{вых}}$ ) от частоты( $f$ , Гц) для второго образца Samsung active glasses ssg-3050gb

Из результатов эксперимента следует, что граничная частота составляет

150 Гц (6,7 мс), следовательно, первый образец подходит для развития мышечного баланса, для развития бинокулярной фиксации, для повышения остроты зрения и увеличения объема аккомодации.

Исследование электрооптических свойств образца **Smart Switchable Glass SW-02**. Была зарегистрирована зависимость оптического пропускания жидкокристаллического стекла от напряжения в 30В при разных частотах питающего напряжения от 1-1000 Гц с шагом в 50 Гц (рис.3).

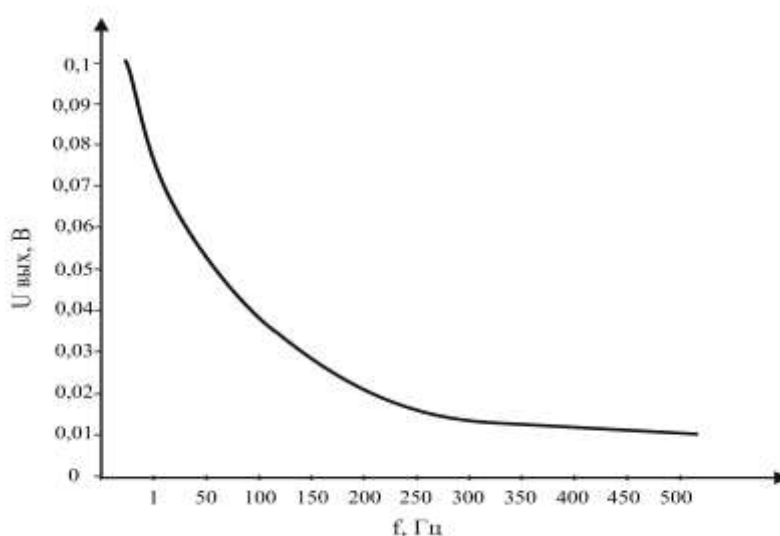


Рис.3 Зависимость выходного напряжения ( $U_{\text{вых}}$ ) от частоты( $f$ , Гц) для образца Smart Switchable Glass SW-02

Из результатов эксперимента следует, что граничная частота составляет 30 Гц (33 мс), следовательно, второй образец подходит для развития мышечного баланса, для повышения остроты зрения и увеличения объема аккомодации, но не подходит для развития бинокулярной фиксации.

Исследование электрооптических свойств образца **Smart Glass ТК**. Была зарегистрирована зависимость оптического пропускания жидкокристаллического стекла от напряжения в 8В при разных частотах питающего напряжения от 1-1000 Гц с шагом в 50 Гц (рис.4).

Из результатов эксперимента следует, что граничная частота составляет 130 Гц (7,7 мс), следовательно, третий образец подходит для развития мышечного баланса, для развития бинокулярной фиксации, для повышения остроты зрения и увеличения объема аккомодации.

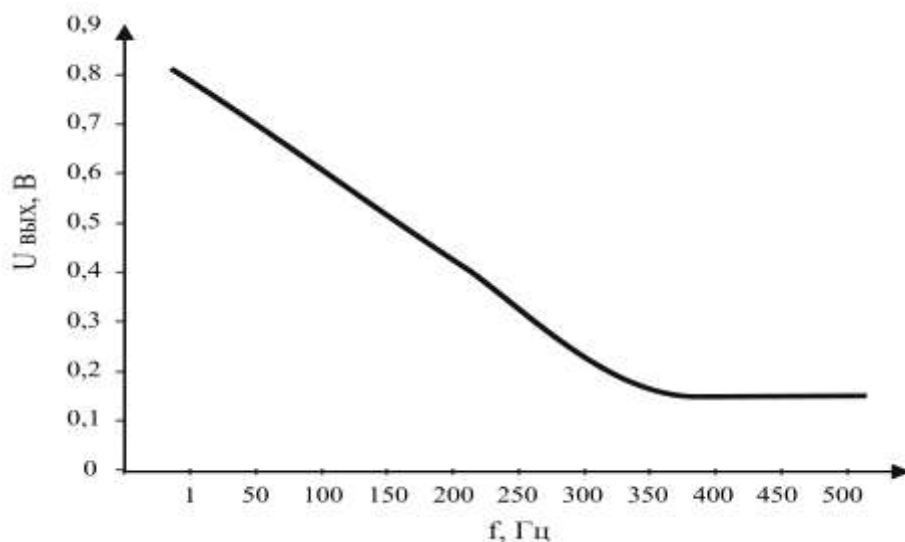


Рис.4 Зависимость выходного напряжения ( $U_{\text{вых}}$ ) от частоты ( $f$ , Гц) для образца Smart Glass ТК

По результатам исследований электрооптических свойств в жидких кристаллах трёх образцов, можно сделать вывод, что 1 и 3 образцы соответствуют всем техническим требованиям для лечения глазных болезней, а именно:

- для развития мышечного баланса используется диапазон интервалов включения ЖКС от 5000 до 150 мс;
- для развития бинокулярной фиксации используется диапазон интервалов включения ЖКС от 250 до 20 мс;
- для повышения остроты зрения используется диапазон интервалов включения ЖКС от 700 до 120 мс.

Таким образом, исследованы жидкие кристаллы, которые могут быть использованы для лечения глазных болезней и улучшения зрения.

#### *Список использованной литературы*

1. Томилин М.Г. Перспективы применения нового поляризационно-оптического микроскопа на основе жидких кристаллов в биологии // Биосфера. 2011. Т. 3. № 3. С. 378-389.
2. Копаева В.Г. Глазные болезни / В.Г. Копаева. - М: Медицина, 2002. С. 153-196.
3. Усанов Д.А., Кащенко Т.П., Скрипаль А.В., Рабичев И.Э., Усанова Т.Б., Абрамов А.В., Ячменева Е.И., Губкина Г.Л. Влияние периодических световых воздействий на параметры нистагма глаз // Вестник офтальмологии. 2004. Т. 120. № 5. С. 42-43.
4. Усанова Т.Б., Постельга А.Э., и др. Контроль эффективности лечения косоглазия при тренировке глазодвигательных мышц // Медицинская техника. 2016. № 1. С. 18-20.
5. Кащенко Т.П., Усанов Д.А., Рабичев И.Э., и др. Устойчивость эффекта уменьшения амплитуды нистагма у детей при периодическом световом воздействии // Вестник офтальмологии. 2008. Т. 124. № 3. С. 46.



## **ОЦЕНКА СИНХРОНИЗОВАННОСТИ РИТМОВ ВЕГЕТАТИВНОЙ РЕГУЛЯЦИИ СЕРДЦА И СОСУДОВ ПО ДЛИТЕЛЬНЫМ ВРЕМЕННЫМ РЯДАМ**

Предложенный ранее метод количественной оценки степени синхронности контуров регуляции кровообращения используется для анализа временных реализаций здоровых испытуемых. Особенности этого метода изучаются при анализе записей, длительность которых составляет сотни характерных периодов колебаний. Полученные результаты позволяют сделать выбор длительности экспериментальной реализации, обеспечивающей заданный уровень флуктуаций оценки предложенного ранее численного индекса, характеризующего степень синхронизации.

**Ключевые слова:** Фазовая синхронизация, вегетативная регуляция, нелинейная динамика, сердечно-сосудистая система, анализ данных

### **Введение**

Исследования взаимодействия и синхронизации элементов сердечно-сосудистой системы человека представляют фундаментальный интерес, направленный на развитие представлений об устройстве сложных систем биологической природы [1]. На основе предложенного нами ранее метода диагностики участков фазовой синхронизованности по нестационарным сигналам сердечно-сосудистой системы был предложен интегральный численный индекс – суммарный процент фазовой синхронизации [1-2]. Было показано, что этот индекс имеет важное значение для решения задач медицинской диагностики различных патологий, прогноза выживаемости пациентов, перенесших инфаркт миокарда, выбора препаратов для терапии патологий сердца и сосудов [3, 4]. При этом в силу технических, организационных и этических ограничений, большинство исследований проводилось при анализе 10 минутных записей сигналов сердечно-сосудистой системы и вопрос о влиянии на свойства оценки степени синхронизованности исследуемых регуляторных контуров длины реализации не рассматривался.

Кроме того, практически отсутствуют данные о динамике свойств синхронизованности, в частности, суммарного процента фазовой синхронизации, на больших временах в сотни характерных периодов колебаний. Известные исследования выполнены на малой статистике и ориентированы преимущественно на рассмотрение особенностей взаимодействия исследуемых контуров регуляции с точки зрения физиологии и биофизики [1-4].

Целью данной работы является исследование статистических свойств метода диагностики интервалов фазовой синхронизации контура вегетативной регуляции частоты сердечных сокращений и контура барорефлекторной регуляции тонуса артериальных сосудов, регулирующего среднее артериальное давление человека, а также статистических свойств суммарного процента фазовой синхронизации при анализе длительных (двухчасовых) записей здоровых испытуемых. В работе особое внимание уделяется вопросу о выборе оптимальной для анализа длительности экспериментальных реализаций. Данная работа представляет основные результаты исследования, подробно изложенные в статье [5].

### **Материалы и методы**

В серии экспериментальных исследованиях участвовали 20 условно здоровых испытуемых в возрасте от 19 до 21 года. Была проведена одновременная регистрация сигнала электрокардиограммы (ЭКГ) и фотоплетизмограммы сосудов (ФПГ) с частотой дискретизации 250 Гц стандартным сертифицированным прибором–регистратором ЭЭГА–21/26 «Энцефалан–131–03» (Медиком-МТД, г. Таганрог). Инфракрасный датчик ФПГ отраженного света был наложен на дистальную фалангу правой руки испытуемого.

Запись экспериментальных данных проводили в спокойной обстановке, испытуемый находился в положении лежа. Длительность каждой записи составляла 120 минут.

Первым этапом анализа variability сердечного ритма сигнала ЭКГ было выделение последовательности кардиоинтервалов (КИГ). В соответствии с методическими рекомендациями, предложенными в известной работе, был сгенерирован эквидистантный ряд КИГ с помощью интерполяции кубическими сплайнами с частотой дискретизации 5 Гц. Вторым этапом обработки экспериментальных данных являлась фильтрация сигналов КИГ и ФПГ в полосе от 0.06 до 0.14 Гц для выделения колебаний с частотами около 0.1 Гц, которые относят к влиянию вегетативной регуляции сердечно-сосудистой системы.

Полученная информация о фазах исходных сигналов позволила провести фазовый анализ процессов регуляции сердца и сосудов. В данной работе с помощью известного метода определения фаз сигналов – преобразования Гильберта были выделены последовательности фаз двух сигналов, а затем найдена их разность. Участки фазовой синхронизации двух исследуемых процессов были диагностированы как участки, разность фаз на протяжении которых была почти неизменной. Диагностика фазовой синхронизации осуществлялась с помощью предложенного ранее метода выявления синхронных участков [2].

Полученные результаты синхронизованности были подвержены корреляционному анализу и статистической обработке.

## **Результаты**

С помощью разработанной ранее методики, были определены участки фазовой синхронизации на протяжении всей длины двухчасовой записи. При анализе полученных данных было отмечено наличие достаточно длительных непрерывных участков фазовой синхронизации, максимальной длительностью для одного из испытуемых составила 145 с (более 10 характерных периодов колебаний).

Визуальный анализ зависимостей длины синхронного участка от времени  $D(t)$  демонстрирует нерегулярный характер последовательности длин

синхронных и несинхронных участков. Анализ корреляционных свойств  $D(t)$  также указал на наличие спадающего характера функции, типичного для случайного процесса. Первый 0 усредненной по ансамблю АКФ наблюдался уже на сдвиге в 200 с.

Функция плотности распределения демонстрировала характерную обратную степенную зависимость, где наблюдение коротких интервалов синхронизации более вероятно, чем длинных.

Одним из главных вопросов данной работы является выбор длительности экспериментальных записей. По техническим и этическим причинам исследователям приходится существенно ограничивать длительность экспериментальных записей. Это приводит к увеличению флуктуации оценок показателей, рассчитываемых по экспериментальным данным. В ходе выполнения данной работы мы искали ответ на вопрос выбора оптимальной длины записей ЭКГ и ФПГ для анализа суммарного процента фазовой синхронизации. Для этого провели исследование зависимости величины оцениваемого суммарного процента фазовой синхронизации  $S$ , % от длительности анализируемого участка экспериментальных сигналов. Для каждого испытуемого строились зависимости  $S$  от длины участка от 10 с до 7200 с. Типичным результатом для всех испытуемых являлась функция, при которой наблюдалось резкое уменьшение флуктуации оценки величины  $S$  при росте окна от 600с.

### **Заключение**

В результате проведенных исследований фазовой синхронизации контуров вегетативной регуляции сердца и сосудов, имеющих собственные частоты колебаний около 0.1 Гц, по двухчасовым записям здоровых испытуемых в возрасте от 19 до 21 года были исследованы статистические и корреляционные свойства предложенного ранее показателя – суммарного процента фазовой синхронизации. Данная мера является персонализированной оценкой степени синхронизации контуров регуляции сердечного ритма и

тонуса сосудистой стенки артерий. Исследуемую оценку индекса  $S$  целесообразно использовать при анализе временных реализаций длительностью от 600 секунд.

*Работа выполнена при поддержке гранта Российского научного фонда 14-12-00291.*

*Список использованной литературы*

1. Безручко Б.П., Гриднев В.И., Караваев А.С., Киселев А.Р., Пономаренко В.И., Прохоров М.Д., Рубан Е.И. Методика исследования синхронизации колебательных процессов с частотой 0.1 Гц в сердечно-сосудистой системе человека // Известия высших учебных заведений. Прикладная нелинейная динамика. 2009. Т.17. №6. С.44-56.
2. Kiselev A.R., Karavaev A.S., Gridnev V.I., Prokhorov M.D., Ponomarenko V.I., Borovkova E.I., Shvartz V.A., Ishbulatov Y.M., Posnenkova O.M., Bezruchko B.P. Method of estimation of synchronization strength between low-frequency oscillations in heart rate variability and photoplethysmographic waveform variability // Russian Open Medical Journal. 2016. V.5. No.1. P.e0101.
3. Kiselev A.R., Gridnev V.I., Posnenkova O.M., Prokhorov M.D., Karavaev A.S., Ponomarenko V.I., Bezruchko B.P. Effects of antihypertensive treatment on cardiovascular autonomic control: a prospective study // Anadolu Kardiyoloji Dergisi. 2014. V.14. No.8. P.701-710.
4. Киселев А.Р., Гриднев В.И., Караваев А.С., Посненкова О.М., Пономаренко В.И., Прохоров М.Д., Безручко Б.П. Сравнительная оценка влияния фозиноприла и атенолола на синхронизацию колебаний с частотой около 0,1 Гц в ритме сердца и микроциркуляции крови у больных артериальной гипертонией // Рациональная фармакотерапия в кардиологии. 2010. Т.6. №6. С.803-811.
5. Сказкина В.В., Киселев А.Р., Боровкова Е.И., Пономаренко В.И., Прохоров М.Д., Караваев А.С. Оценка синхронизованности контуров вегетативной регуляции кровообращения по длительным временным рядам // Нелинейная динамика. 2018. Т.14. №1. С.3–12.

***В.С. Хорев<sup>1,2</sup>, А.Р. Киселев<sup>1,2,3</sup>, Б.П. Безручко<sup>1,2</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

<sup>3</sup>Саратовский государственный медицинский университет имени В.И. Разумовского

**ОЦЕНКА ОСОБЕННОСТЕЙ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ МЕЖДУ ПОДСИСТЕМАМИ РЕГУЛЯЦИИ ВАРИАбельНОСТИ RR-ИНТЕРВАЛОВ И КРОВЕНАПОЛНЕНИЯ ДИСТАЛЬНЫХ СОСУДОВ**

В представленной статье рассмотрены проблемы выявления особенностей взаимодействия между подсистемами регуляции сердечно-сосудистой системе,

включающей низкочастотные ритмы variability RR-интервалов и кровенаполнения дистальных сосудов с характерными частотами порядка 0.1 Гц. Автором проанализированы временные ряды кардиоинтервалограмм и фотоплетизмограмм здоровых испытуемых с помощью метода, основанного на построении моделей фазовой динамики.

**Ключевые слова:** Фазовая динамика, задержка, взаимодействие, сердечно-сосудистая система, вегетативная регуляция.

Ухудшение вегетативной регуляции под влиянием внешних факторов связаны с развитием различных патологических состояний, например, вегетативно-сосудистой дистонии и артериальной гипертензии. Как было показано в наших предыдущих работах [1–4], особенности взаимодействия регуляторных подсистем являются чувствительными маркерами различных патологий в органах и системах, и их результаты очень перспективны для разработки диагностических методов. Кроме того, такие исследования важны для приобретения базовых знаний о структуре сердечно-сосудистой системы, что необходимо для понимания механизмов ее функционирования в норме и патологии. Наконец, выработка фундаментального потенциала для разработки математических моделей сердечно-сосудистой системы, которые открывают широкие перспективы для решения актуальных физиологических и прикладных медицинских проблем. Более того, структура и поведение таких систем физиологической природы оказывается близкой к структуре некоторых технических систем [5], позволяя решать задачи исследования систем различных типов с единых позиций.

До недавнего времени фундаментальные ограничения на использование инвазивных измерений при работе с живыми системами не позволяли производить исследования особенностей регуляции в сердечно-сосудистой системе, однако разработка компьютерных технологий и методов анализа из области нелинейной динамики для обработки сигналов сложных систем открыла возможности для исследования сложной динамики регуляторных подсистем.

В этой статье перспективный метод диагностики связи колебательных

систем на основе прогностических моделей мгновенной фазы сигналов кровенаполнения дистальных сосудов с основным периодом порядка 10 секунд. Впервые такое исследование было проведено при анализе длинных записей здоровых субъектов, содержащих более 700 характерных периодов.

В ходе работы был проведен анализ записей, полученных со здоровых испытуемых (возраст 25–30 лет), не имевших признаков патологии сердечно-сосудистой системы. Нами были использованы одновременные записи сигналов второго отведения электрокардиограммы (ЭКГ) и фотоплетизмограммы (ФПГ), снятой с дистальной фаланги указательного пальца длительностью 120 минут.

Для анализа связи сигналов подсистем регуляции мы использовали метод, основанный на моделировании фазовой динамики. Основная идея метода заключается в оценке того, насколько будущая эволюция фазы одной системы зависит от текущего значения фазы другой системы. Если учет динамики одной системы, уменьшает погрешность предсказания, полученную индивидуальной динамикой второй системы, то это рассматривается как влияние первой системы на вторую систему и может быть оценено количественно:

$$J_{1,2} = \frac{1}{2\pi^2} \int_0^{2\pi} \int_0^{2\pi} \left( \frac{\partial F(\varphi_{1,2}(t), \varphi_{2,1}(t-D), \mathbf{a}_{1,2})}{\partial \varphi_{1,2}} \right)^2 d\varphi_1 d\varphi_2, \quad (1)$$

где  $J_{1,2}$  — оценка влияния одной системы на другую,  $\mathbf{a}_k$  — векторы коэффициентов,  $D$  — пробное время задержки,  $\varphi_{1,2}$  — фазы сигналов.

Оценка коэффициентов  $J_{1,2}(D)$  сопровождалась вычислением доверительного интервала с использованием аналитической формулы. В предположении слабой связи, когда различия между наблюдаемыми значениями и значениями, предсказанными моделью, являются независимыми гауссовскими случайными процессами, формула дает 95% доверительный интервал, применимый даже для коротких и шумных временных рядов.

Ряды данных здоровых испытуемых длиной 120 минут каждый анализировали в скользящих окнах продолжительностью 20 минут (около 120

характерных периодов колебаний) со сдвигом окна 10 минут. В каждом окне вычислялись значения индексов  $J_{1,2}(D)$ . Значение  $D$  изменялось в диапазоне 0–10 секунд. Результаты анализа связи в таких окнах для одного из испытуемых показаны на рисунке 1. Здесь и ниже индекс 1 соответствует направлению связи от подсистемы регуляции variability сердечного ритма на систему регуляции дистального кровотока, индекс 2 соответствует направлению связи в обратном направлении.

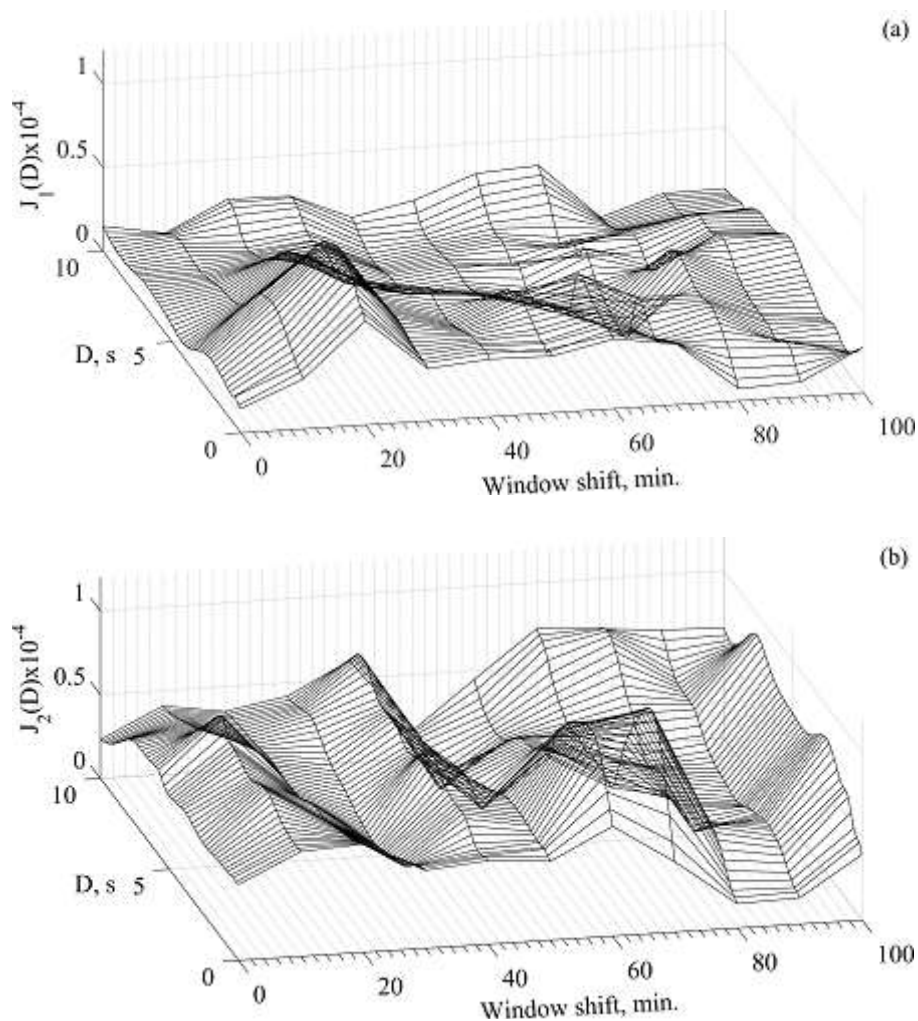


Рисунок 1. Результаты анализа связанности в 20 минутных окнах с 50% перекрытием для одного из испытуемых: (а)  $J_1(D, t_i)$ , (б)  $J_2(D, t_i)$ ,  $t_i$  — сдвиг окна.

Средние значения лагов при анализе воздействия подсистемы регуляции variability сердечного ритма на систему регуляции дистального кровотока составили  $0.9 \pm 0.4$  с, для воздействия в обратном направлении —  $4.1 \pm 1.1$  с (представлены средние значения и стандартные ошибки), что объясняется тем,



что ответ на стимул, предъявляемый системой регуляции дистального кровотока опосредуется через вегетативную нервную систему (барорефлекс), а ответ на стимул подсистемы регуляции сердечных сокращений опосредуется механически через сердечный выброс. Полученные результаты хорошо согласуются с современными представлениями об устройстве и организации взаимодействия подсистем регуляции в сердечно-сосудистой системе. Было продемонстрировано качественное соответствие результатов оценки преимущественного направления, а также оценки силы воздействия, задержки в связи между системами с теоретическими ожиданиями.

*Работа выполнена при поддержке гранта Президента Российской Федерации МД-3318.2017.7 (сбор экспериментальных данных, статистическая обработка результатов исследования), РФФ №14-12-00291 (нелинейные методы анализа данных)*

*Список использованной литературы:*

1. Безручко Б.П., Гриднев В.И., Караваев А.С., Киселев А.Р., Пономаренко В.И., Прохоров М.Д., Рубан Е.И. Методика исследования синхронизации колебательных процессов с частотой 0.1 Гц в сердечно-сосудистой системе человека // Известия высших учебных заведений. Прикладная нелинейная динамика. 2009. Т. 17. № 6. С. 44-56.
2. Kiselev A.R., Gridnev V.I., Posnenkova O.M., Prokhorov M.D., Karavaev A.S., Ponomarenko V.I., Bezruchko B.P. Effects of antihypertensive treatment on cardiovascular autonomic control: a prospective study // Anadolu Kardiyoloji Dergisi. 2014. V. 14. No. 8. P. 701-710.
3. Kiselev A.R., Karavaev A.S., Gridnev V.I., Prokhorov M.D., Ponomarenko V.I., Borovkova E.I., Shvartz V.A., Ishbulatov Yu.M., Posnenkova O.M., Bezruchko B.P. Method of estimation of synchronization strength between low-frequency oscillations in heart rate variability and photoplethysmographic waveform variability // Russian Open Medical Journal. 2016. V. 5. No. 1. P. 0101.
4. Киселев А.Р., Гриднев В.И., Караваев А.С., Посненкова О.М., Пономаренко В.И., Прохоров М.Д., Безручко Б.П. Сравнительная оценка влияния фозиноприла и атенолола на синхронизацию колебаний с частотой около 0,1 Гц в ритме сердца и микроциркуляции крови у больных артериальной гипертензией // Рациональная фармакотерапия в кардиологии. 2010. Т. 6. № 6. С. 803-811.
5. Ponomarenko V.I., Prokhorov M.D., Karavaev A.S., Kulminskiy D.D. An experimental digital communication scheme based on chaotic time-delay system // Nonlinear Dynamics. 2013. T. 74. № 4. С. 1013-1020.

## УПРАВЛЕНИЕ КАЧЕСТВОМ, ИННОВАТИКА

*А.М. Асташина, Е.В. Боброва, Р.М. Ляушин*

Саратовский национальный исследовательский государственный университет  
имени Н.Г. Чернышевского

### ПРОБЛЕМЫ КОММУНИКАЦИЙ В СОВРЕМЕННОЙ ОРГАНИЗАЦИИ И ПУТИ ИХ РЕШЕНИЯ

Статья посвящена проблемам коммуникации в организации. Приведены разъяснения к коммуникации и информации, рассмотрены виды коммуникаций, выделены причины нарушения коммуникационных связей, рассмотрены возможные причины появления проблем коммуникаций в метрологическом отделе на предприятии АО «НЕФТЕМАШ»-САПКОН», предложены рекомендации для улучшения коммуникаций в организации.

**Ключевые слова:** коммуникации, виды коммуникации, причины коммуникаций, метрология.

В настоящее время проблемам коммуникации в организации уделяется большое значение. Ведь одной из важнейших задач управления является правильное построение коммуникационных сетей и создание условий для успешного их функционирования. Коммуникация - это передача информации от одного субъекта к другому, причем в качестве субъектов могут выступать как отдельные личности, группы, так и целые организации [1]. Для того, чтобы акт коммуникации состоялся, необходимо наличие как минимум двух людей. Главная цель коммуникации – это обеспечение взаимопонимания между всеми работниками организации, участвующими в информационном обмене [2].

«Коммуникация» и «информация» хотя и различные, но взаимосвязанные понятия. Коммуникация включает в себя не только то, что передается, но и как передается. Для того, чтобы обеспечить существование и эффективность деятельности организации не достаточно будет одной информации, её необходимо будет обработать и передать соответствующим образом, т.е создать коммуникативные связи. Для многих организаций проблематичным является регулирование информационных потоков. Как правило, основными причинами нарушения коммуникационных связей

являются:

1. Неправильная адресация информации, т.е информация не всегда попадает к тому, к кому она должна попасть.
2. Несвоевременность доставки, т.е информация должна поступать тогда, когда ещё имеет смысл её анализировать.
3. Предвзятое отношение людей к новой информации, т.к она кажется им сомнительной.
4. Неумение слушать собеседника.
5. Скованность работников, нежелание идти на контакт.
6. Искаженность, т.е пока информация дойдет до нужного человека, она может потерять смысл.
7. Неравномерность информационной нагрузки, т.е кто-то страдает от избытка информации, а кто-то испытывает «информационный голод» [3].

Выделяют следующие виды коммуникаций: внутренние и внешние, вербальные и невербальные, а также формальные и неформальные. Широкое распространение получили неформальные коммуникации: за счёт слухов информация может дойти до огромного числа работников за короткий промежуток времени. Необходимо научиться пользоваться системой слухов и не препятствовать неформальным коммуникациям [4].

Как показали исследования, руководители от 50 до 90% времени тратят на коммуникации, но при осуществлении коммуникации снизу вверх до руководителя доходит в основном только 10% информации [2].

Например, на современном машиностроительном предприятии АО «НЕФТЕМАШ»-САПКОН» для решения проблем коммуникаций в организации разработан определенный порядок доведения информации до всех заинтересованных лиц, изложенный в соответствующих инструкциях [5]. Но несмотря на это, в отделе метрологии как и в любом другом отделе тоже существуют различные препятствия и возникают различные затруднения, касающиеся коммуникационного процесса.

Рассмотрим возможные причины появления проблем коммуникаций в

метрологическом отделе:

I. Ведущий инженер по метрологии информирует начальника участка о сроках сдачи средств измерений на проверку. Начальник участка по каким-либо причинам вовремя не сообщает рабочим данную информацию. В результате средства измерений попадают на проверку позже установленных сроков. В данной ситуации наблюдается *несвоевременная доставка информации*.

II. Ведущий инженер по метрологии просит начальника участка известить рабочих о сдаче на проверку в n-ый день штангенглубиномеров. Начальник участка, в свою очередь, попросил одного из рабочих сообщить эту информацию остальным рабочим. В результате на проверку принесли штангенциркули вместо штангенглубиномеров. В данном случае наблюдается *неумение слушать и искажение информации*.

III. В отдел метрологии принесли на проверку микрометры. На каждом из них написана фамилия рабочего, в чьем распоряжении в данный момент он находится. После проверки микрометры были возвращены рабочим, вследствие чего обнаружилось, что один микрометр попал ни к тому рабочему. Причиной того стало то, что на нем была написана фамилия предыдущего владельца. В данном случае наблюдается *неправильная адресация информации*.

Для улучшения коммуникации в организации можно предложить следующие рекомендации:

- Четко определить и сформулировать задачи;
- Сформировать четкое представление о потребностях в информации начальника и подчиненных;
- Планировать, реализовывать и контролировать улучшения информационного обмена;
- Обсуждать планы, задачи и пути их решения;
- Совершенствовать систему обратной связи;
- Проводить опросы работников;
- Совершенствовать систему сбора информации;

- Создавать каналы информационных связей, например, через стенды, статьи и радио;
- Внедрять современные информационные технологии, например, видеоконференции [3].

Таким образом, для успеха любой организации очень важным является разработка и развитие эффективной системы коммуникации, контроль за её функционированием, а также совершенствование системы информационного обмена.

*Список использованной литературы:*

1. Зленко, А.М. Проблемы коммуникаций в управлении организацией / А.М. Зленко, Исайкина О.Д // Экономический вестник университета. Сборник научных трудов ученых и аспирантов. 2016. С. 56-57.
2. Файншмидт Е.А. Теория менеджмента: учебный курс / Е.А. Файншмидт. – М.: МБА, 2013. 312с.
3. Грунистая, О.С. Коммуникации как проблема взаимодействия сотрудников в современной организации / О.С. Грунистая // Сборники конференций НИЦ Социосфера, 2013. №8. С. 100-104.
4. Гнатюк, О.Л. Основы теории коммуникации: учебное пособие / О.Л. Гнатюк. – М.: КНОРУС, 2010. – 256с.
5. Асташина, А.М. Оценка результативности интегрированной системы менеджмента на предприятии АО «НЕФТЕМАШ»-САПКОН / А.М. Асташина, Е.М. Ревзина // Нано- и биомедицинские технологии. Управление качеством. Проблемы и перспективы. Сборник научных статей. Саратов. 2016. С. 9-14.

*М.М. Ждано, Д.Д. Наумов, С.Н. Крылов, Е.М. Ревзина  
Саратовский национально-исследовательский университет им. Н.Г.  
Чернышевского*

## **ПРОБЛЕМЫ ВНЕДРЕНИЯ ИННОВАЦИЙ В ПРЕДПРИЯТИИ**

Несмотря на декларируемый курс правительства России по модернизации экономики, ее диверсификацию, ориентированность на инновации, в настоящее время она все еще остается в большой степени зависима от экспорта энергоносителей: нефти, газа. Так, 5,050 трлн. руб. было получено в 2017 году на продаже энергоносителей. Для сравнения, 4,895 трлн. руб. было получено за счет НДС, только 0,151 трлн. руб. было получено за счет развития науки и технологий[1,2].

Очевидно, что необходимо повсеместно внедрять инновации во все сферы экономики. Именно инновации позволяют рассчитывать на долгосрочный, стабильный экономический рост. Сейчас как никогда важно развивать и внедрять инновации. В связи с этим становится актуальным такой термин как инновационное предпринимательство.

Инновационное предпринимательство — особый новаторский процесс создания чего-то нового; процесс хозяйствования, в основе которого постоянный поиск новых возможностей, ориентация на инновации[3]. Выделяют 3 вида инновационного предпринимательства:

1. изготовление инновационной продукции (обновление сбытового потенциала),
2. создание инновационных технологий (специфический процесс обновления производства),
3. формирование социальных инноваций, т. е. производства с использованием современных инновационных методов и способов в управлении (традиционный процесс планомерного улучшения гуманитарной сферы).

Инновационное предпринимательство — разнообразная, многогранная и обширная экономическая активность, деятельность юридических или физических лиц. Малые и средние инновационные предприятия могут быть созданы на базе бизнес-инкубаторов и деловых центров или внедренческих структур. Последние занимаются реализацией, патентованием инноваций, оформлением лицензий и продвижением на рынок. Вместе бизнес-инкубаторы, деловые центры и внедренческие структуры и др. образуют так называемую инновационную инфраструктуру. Инновационной инфраструктура - это объединение взаимосвязанных структур, которые обслуживают и обеспечивают развитие инновационной деятельности. государство делает шаги в сторону создания инфраструктуры для развития и внедрения инноваций: достаточно лишь упомянуть проект «Инновационный центр «Сколково»» - научно-технологический комплекс по созданию и коммерциализации новых

технологий. В развитых регионах страны создают технопарковые структуры, такие как: Научноград Кольцово и технопарк новосибирского Академгородка, Кузбасский технопарк, автономная некоммерческая организация «Красноярский городской инновационно-технологический бизнес-инкубатор», Агропарк в Татарстане - первый в России и т.д. Однако стоит отметить, что все эти проекты рассчитаны на перспективу и для того, чтобы добиться необходимых результатов требуются определенное время и немалые финансовые вложения. Главный технопарковый проект - «Сколково» представляет собой прообраз «Кремниевой долины» - самой успешной и крупнейшей в мире технопарковой зоны, которая находится в штате Калифорния в США. Однако своего сегодняшнего вида «Кремниевая долина» достигла только спустя шестьдесят лет после образования.

Таким образом, на практике, внедрение инноваций — сложный процесс. Многие трудности, связанные с внедрением инноваций уже описывались в литературе, например в [4,5,6,7]. Среди них выделяют, например:

- непонимание подчиненных и коллег,
- отсутствие квалифицированных исполнителей,
- нехватка людей,
- нежелание руководства внедрять новшества,
- система внедрения инноваций сверху,
- бюрократизм и излишняя отчетность,
- отсутствие механизма и четко прописанных процедур внедрения инноваций,
- политика «раньше работали и сейчас продолжайте»

Существуют и другие проблемы, однако большинство из них можно классифицировать как кадровые или организационные. Тем не менее, стоит заметить, что не существует какого-либо универсального способа преодоления каждой этих проблем: в каждом конкретном случае, на каждом конкретном предприятии существует своя специфика, которая не позволит применить известные методы со 100% эффективностью. Однако, зная особенности

психологии работников становится возможно успешно разработать и применять инновационную политику предприятия, которая позволит успешно развивать предприятия, внедрять инновации. Разработка такой политики требует решения следующих задач:

- Формирование политики и координация деятельности в этой области производственных подразделений,
- Создание проблемно-целевых групп для решения проблем на разных этапах разработки и внедрения инноваций,
- Разработка планов и программ инновационной деятельности,
- Обеспечение таких программ необходимыми ресурсами,
- Обучение персонала,
- Наблюдение за ходом разработки новой продукции и ее внедрения.

Решая эти задачи, можно успешно преодолеть большинство организационных и кадровых проблем, связанных с внедрением инноваций. Однако, к сожалению, в настоящее время не предусмотрено существенных льгот для инновационных предприятий, что отрицательно сказывается на заинтересованности менеджмента таких предприятий в дальнейших нововведениях, а также темпах внедрения. К другим административным проблемам можно отнести, например, бюрократию со стороны государственных и муниципальных органов власти, коррупцию.

Рассматриваемые в данной статье вопросы составляют не весь список проблем, которые препятствуют внедрению новшеств в России. Но даже они представляют весьма серьезную угрозу для процесса развития инновационной деятельности и экономики страны в целом. Развитие инноваций в Российской Федерации представляет собой ключевой фактор выживания и стратегического позиционирования России в мировом сообществе.

#### Список использованной литературы

2. Иваненко Л. В., Петров С. М. Проблемы внедрения инноваций в деятельность малых и средних строительных предприятий // Основы ЭУП. 2012. №2. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/problemy-vnedreniya-innovatsiy-v-deyatelnost-malyh-i-srednih-stroitelnyh-predpriyatiy> (дата обращения: 31.03.2018).



3. Медведева Т.А. Проблемы внедрения инноваций на российских предприятиях: организационный и кадровый аспекты // Научные исследования экономического факультета. Электронный журнал. 2013. №2, С. 15-24 URL: <https://archive.econ.msu.ru/sys/raw.php?o=3429&p=attachment> (дата обращения: 31.03.2018)
4. Асташина А.М., Боброва Е.В. Проблемы, с которыми сталкиваются вузы при внедрении инноваций // Технологический форсайт: проектирование, внедрение, контроль, анализ. Сборник научных трудов по материалам Всероссийской школы-конференции. Изд.: Техно-декор, Саратов. 2016. С. 149-151
5. Цифрова Р.-М.В., Крылов С.Н., Гагина И.С. Развитие управленческого учета для принятия инвестиционных решений // Региональная власть, местное самоуправление и гражданское общество: механизмы взаимодействия, сборник научных трудов, изд.: ПИУ РАНХиГС, Саратов, 2017, С. 160-161
6. Исаева Т.А., Крылов С.Н. Проблемы автоматизации учёта ндфл при переходе на новые формы отчётности // В мире научных открытий – мат. Межд. студенческой научной конф., изд.: Технологический институт - филиал федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования "Ульяновская государственная сельскохозяйственная академия имени П.А. Столыпина, Димитровград, 2017, С. 3-6

***С.Н. Крылов, О.Ю. Кондратьева, Е.М. Ревзина, Е.В. Кондратьева***  
Саратовский национальный исследовательский государственный университет  
имени Н.Г. Чернышевского

## **ОПРЕДЕЛЕНИЕ УРОВНЯ ИННОВАЦИОННОГО РАЗВИТИЯ РЕГИОНОВ**

В настоящее время, во время экономического спада, для каждого региона немаловажной задачей является привлечение инвестиций. Для этого инвесторам нужно предоставить исчерпывающую информацию об инвестиционных проектах и связанных с ними рисках, для чего составляются различного рода рейтинги деловой активности, инновационного развития. Однако существующие рейтинги не учитывают информацию о земельных ресурсах, что, на наш взгляд, может являться существенным. Вопрос необходимости учета этой информации в подобных рейтингах будет рассмотрена в данной статье.

В настоящее время существует несколько признанных рейтингов инновационного развития региона, однако ни один из них не учитывает использование земельных ресурсов, например распределение земельных ресурсов по различным категориям. Данная информация может служить хорошим индикатором готовности региона к внедрению инноваций и дальнейшему развитию промышленности.

Согласно определению, инновационная деятельность – выполнение работ и (или) оказание услуг, направленных на:

- создание и организацию производства принципиально новой или с новыми потребительскими свойствами продукции (товаров, работ, услуг);
- создание новых или модернизацию существующих способов (технологий) производства продукции, распространения и использования указанной продукции.

Субъектами инновационной деятельности, как известно, являются юридические лица независимо от их организационно-правовой формы и формы собственности, индивидуальные предприниматели и физические лица, осуществляющие инновационную деятельность.

Для исследования были рассмотрены только определенные регионы — субъекты РФ: Московскую, Ленинградскую, Саратовскую, Самарскую области и республику Татарстан. Для данных субъектов характерен разный уровень ВВП, разный уровень жизни и разное распределение земель по различным категориям, поэтому данные регионы могут наглядно продемонстрировать необходимость учета информации о земельных ресурсах. Сводная таблица распределения этих ресурсов по данным Росреестра в этих регионах (табл. 1) представлена ниже.

Показано, что с 2005 по 2016 для всех регионов характерно уменьшение количества сельскохозяйственных земель и увеличения количества земель промышленности и иного назначения, однако данная зависимость немонотонна для некоторых из представленных регионов. Данные с этой таблицы в дальнейшем будут использованы для определения связи с индикаторами инновационного развития регионов.

Таблица 1. Распределение земельных ресурсов в субъектах РФ.

Года	Московская область			Ленинградская область			Саратовская область			Самарская область			республика Татарстан		
	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3
2005	38,68%	11,01%	<b>5,93%</b>	20,39%	2,76%	<b>4,52%</b>	83,69%	3,61%	<b>2,06%</b>	76,83%	6,38%	<b>1,29%</b>	68,74%	5,09%	<b>1,18%</b>
2006	38,82%	11,12%	<b>6,02%</b>	20,39%	2,76%	<b>4,52%</b>	83,69%	3,61%	<b>2,06%</b>	76,82%	6,39%	<b>1,29%</b>	68,67%	5,13%	<b>1,20%</b>
2007	38,22%	11,75%	<b>6,04%</b>	20,36%	2,76%	<b>4,55%</b>	83,70%	3,62%	<b>2,07%</b>	76,78%	6,43%	<b>1,30%</b>	68,62%	5,19%	<b>1,21%</b>
2008	38,10%	11,86%	<b>6,05%</b>	20,34%	2,79%	<b>4,57%</b>	83,90%	3,63%	<b>2,07%</b>	76,66%	6,54%	<b>1,30%</b>	68,50%	5,28%	<b>1,23%</b>
2009	37,93%	12,00%	<b>6,08%</b>	20,34%	2,79%	<b>4,57%</b>	84,40%	3,63%	<b>2,07%</b>	76,51%	6,63%	<b>1,29%</b>	68,26%	5,70%	<b>1,16%</b>
2010	37,79%	12,14%	<b>6,09%</b>	20,33%	2,80%	<b>4,57%</b>	84,72%	3,64%	<b>2,08%</b>	76,34%	6,65%	<b>1,31%</b>	68,21%	5,75%	<b>1,17%</b>
2011	37,61%	12,24%	<b>6,10%</b>	20,33%	2,80%	<b>4,58%</b>	84,82%	3,64%	<b>2,09%</b>	76,02%	6,68%	<b>1,31%</b>	68,16%	5,77%	<b>1,19%</b>
2012	37,56%	12,21%	<b>6,27%</b>	20,32%	2,81%	<b>4,58%</b>	84,83%	3,64%	<b>2,09%</b>	76,00%	6,70%	<b>1,32%</b>	68,24%	5,91%	<b>1,21%</b>
2013	37,40%	12,35%	<b>6,24%</b>	20,30%	2,82%	<b>4,59%</b>	84,83%	3,64%	<b>2,09%</b>	75,98%	6,71%	<b>1,33%</b>	68,26%	5,95%	<b>1,22%</b>
2014	37,06%	12,43%	<b>6,38%</b>	20,30%	2,82%	<b>4,60%</b>	84,83%	3,63%	<b>2,10%</b>	75,96%	6,71%	<b>1,33%</b>	68,36%	5,95%	<b>1,27%</b>
2015	36,42%	12,54%	<b>6,42%</b>	20,30%	2,82%	<b>4,60%</b>	84,84%	3,64%	<b>2,10%</b>	75,93%	6,71%	<b>1,33%</b>	68,32%	5,96%	<b>1,29%</b>
2016	36,36%	12,58%	<b>6,46%</b>	20,29%	2,82%	<b>4,60%</b>	84,82%	3,64%	<b>2,20%</b>	75,93%	6,71%	<b>1,33%</b>	68,30%	6,01%	<b>1,31%</b>

7. Земли сельскохозяйственного назначения,
8. Земли населенных пунктов,
9. Земли промышленности и иного назначения.

В рамках исследования было рассмотрено несколько вариантов таких индикаторов, например рейтинги, предложенные Национальным исследовательским университетом «Высшая школа экономики» (далее НИУ ВШЭ) или Ассоциацией инновационных регионов России (далее - АИРР). В этих двух организациях было проведено фундаментальное исследование состояния инновационной деятельности в России. Так, разработанный АИРР рейтинг учитывает 23 показателя (с 2016 — 29) и представлен для выбранных ранее регионов на рис.1 ниже:

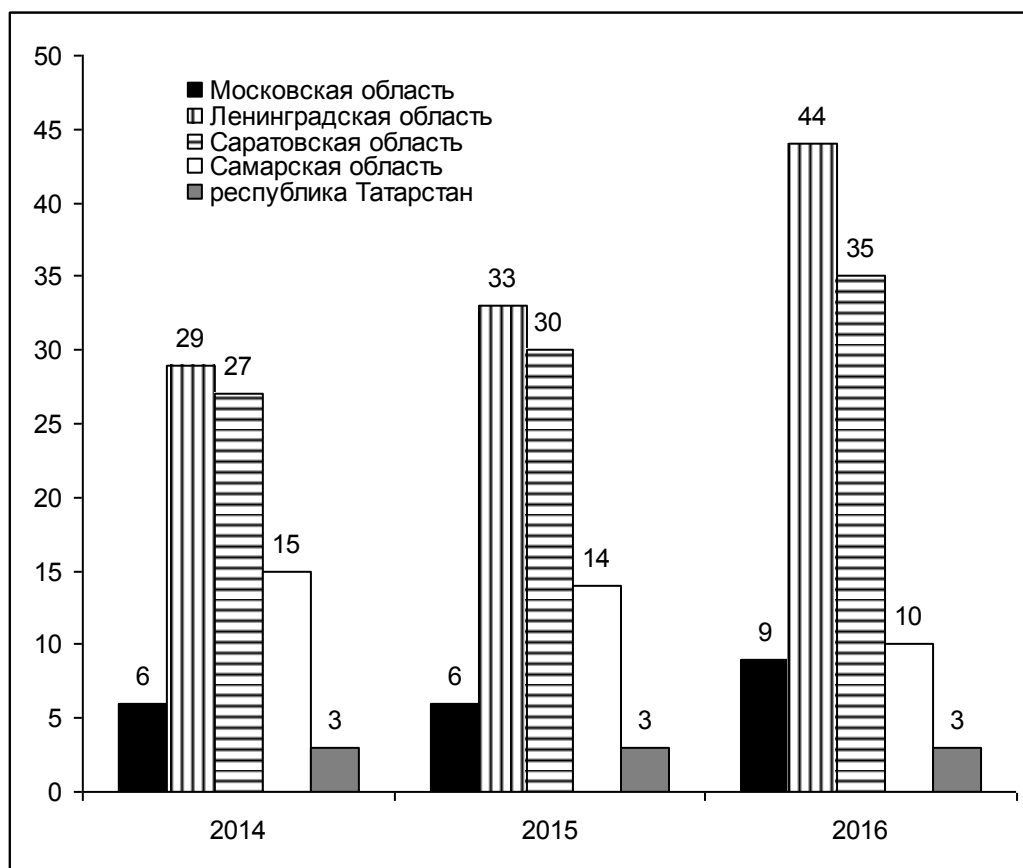


Рис. 1. Рейтинг регионов от АИРР

Республика Татарстан занимает третью строчку в рейтинге на протяжении последних 3 лет вместе с Москвой и Санкт-Петербургом (на графике не показаны), Самарская область переместилась с 15 на 10 место, в то время как остальные выбранные регионы демонстрируют ухудшения в сфере инноваций.

Согласно информации на официальном сайте, основу данного рейтинга формируют показатели по 4 категориям:

4. Научные исследования и разработки,
5. Инновационная деятельность,
6. Социально-экономические условия инновационной деятельности,
7. Инновационная активность региона.

Разработанный в НИУ ВШЭ рейтинг состоит из 37 показателей (на рисунках не представлен), также разделенным по 4 категориям:

- Социально-экономические условия инновационной деятельности,
- Научно-технический потенциал,
- Инновационная деятельность,
- Качество инновационной политики.

В открытом доступе по рейтингу от АИРР имеются данные лишь за 2014-2016 гг., что не позволяет использовать его в рамках данного исследования: полученные результаты по такому короткому ряду не будут статистически значимыми. Аналогичная ситуация сложилась и с рейтингом от НИУ ВШЭ: в открытом доступе имеются данные не ранее 2012 г.

Так как в открытом доступе не представлена полная информация о методике подсчета данных рейтингов, то подсчитать их за предыдущие годы самостоятельно не представляется возможным. Тем не менее, так как участвующие в формировании данных рейтингов показатели известны, а большинство из них доступны в открытых источниках, то нами был сформирован собственный рейтинг для выбранных регионов за 2005 — 2016 гг., который учитывает некоторые из показателей (за основу взят в первую очередь рейтинг от АИРР):

- Научные исследования и разработки:
- Численность студентов образовательных учреждений высшего профессионального образования по отношению к численности населения,
- Численность исследователей по отношению к численности населения,
- Коэффициент изобретательской активности,

- Распределение читателей eLibrary.ru по регионам (история данного показателя в открытом доступе не представлена, поэтому взята постоянная величина на 05.12.2017),
- Внутренние затраты на исследования и разработки в процентах от ВРП,
- Инновационная деятельность и уровень развития информационного общества:
- Удельный вес организаций, осуществлявших технологические инновации, в общем числе организаций,
- Удельный вес организаций, использовавших Интернет,
- Социально-экономические условия инновационной деятельности:
- Степень износа основных фондов,
- Удельный вес занятых в высокотехнологичных и среднетехнологичных (высокого уровня) видах деятельности в общей численности занятых в экономике региона,

Данные показатели представлены в табл. 2 и 3 ниже. Цифрами 1 — 7 обозначены показатели:

1. Численность студентов образовательных учреждений высшего профессионального образования на 10000 человек населения, нормированное на среднее число студентов по регионам РФ;
2. Численность персонала, занятого научными исследованиями и разработками, тыс. чел, нормированное на число населения региона;
3. Коэффициент изобретательской активности;
4. Внутренние затраты на исследования и разработки в процентах от ВРП;
5. Удельный вес организаций, осуществлявших технологические инновации, в общем числе обследованных организаций;
6. Степень износа основных фондов на конец года;
7. Удельный вес инновационных товаров, работ, услуг, в общем объеме отгруженных товаров, выполненных работ, услуг организаций;

Таблица 2. Показатели инновационного развития регионов, основанные на рейтингах НИУ ВШЭ и АИРР для Московской, Ленинградской и Саратовской областей

года	Московская область							Ленинградская область							Саратовская область						
	1	2	3	4	5	6	7	1	2	3	4	5	6	7	1	2	3	4	5	6	7
2005	55,88%	1,31%	2,27	3,07%	0,00%	39,40%	0,00%	23,67%	0,38%	0,80	0,80%	0,00%	38,90%	0,00%	118,09%	0,26%	1,39	0,63%	0,00%	46,10%	0,00%
2006	59,73%	5,56%	2,93	3,52%	8,10%	40,00%	5,20%	27,80%	0,39%	1,10	0,78%	8,10%	40,40%	0,40%	126,62%	0,24%	2,12	0,51%	7,70%	46,60%	2,80%
2007	68,27%	5,40%	3,32	3,17%	8,10%	40,00%	6,30%	30,83%	0,40%	0,92	0,84%	5,80%	39,40%	0,30%	133,51%	0,22%	2,08	0,60%	7,80%	47,60%	3,00%
2008	70,47%	5,17%	3,57	2,80%	6,50%	40,50%	9,90%	33,86%	0,39%	1,05	0,92%	4,30%	39,20%	1,40%	134,88%	0,21%	1,89	0,57%	5,50%	48,00%	4,40%
2009	70,74%	5,14%	3,05	3,54%	6,10%	41,40%	9,40%	30,83%	0,40%	0,97	0,86%	7,30%	38,80%	1,80%	138,74%	0,20%	1,90	0,57%	5,80%	49,00%	7,90%
2010	74,32%	1,19%	3,37	3,55%	6,10%	42,20%	8,10%	28,90%	0,38%	1,75	0,90%	7,30%	39,30%	2,40%	140,39%	0,20%	1,83	0,63%	5,40%	51,50%	7,00%
2011	68,54%	1,20%	3,41	3,68%	5,80%	40,90%	6,90%	28,08%	0,37%	1,73	0,79%	7,60%	41,40%	2,50%	130,20%	0,19%	2,12	0,62%	5,20%	53,00%	2,70%
2012	60,01%	1,23%	4,86	3,59%	4,30%	44,00%	10,50%	23,40%	0,37%	1,32	0,92%	8,70%	36,20%	1,10%	121,39%	0,19%	1,81	0,63%	3,40%	52,50%	1,60%
2013	56,71%	1,20%	4,10	3,66%	7,20%	45,20%	12,70%	22,02%	0,36%	0,91	0,79%	10,00%	36,00%	0,30%	113,69%	0,20%	1,83	0,54%	5,40%	52,40%	3,90%
2014	56,16%	1,21%	3,34	3,84%	7,70%	46,40%	12,90%	19,54%	0,40%	0,85	0,94%	50,00%	38,70%	1,70%	106,80%	0,19%	1,79	0,59%	12,50%	50,60%	5,50%
2015	49,55%	1,17%	2,99	4,11%	7,20%	40,90%	13,70%	17,34%	0,41%	0,69	0,28%	50,00%	41,40%	0,80%	100,20%	0,21%	1,58	3,09%	5,40%	53,00%	5,70%

Таблица 3. Показатели инновационного развития регионов, основанные на рейтингах НИУ ВШЭ и АИРР для Самарской области республики Татарстан

года	Самарская область							республика Татарстан						
	1	2	3	4	5	6	7	1	2	3	4	5	6	7
2005	139,29%	0,76%	1,92	1,92%	0,00%	49,10%	0,00%	139,84%	0,38%	1,86	0,63%	0,00%	40,30%	0,00%
2006	146,72%	0,78%	3,52	1,99%	12,70%	50,20%	25,40%	151,40%	0,38%	3,41	0,68%	11,30%	47,00%	16,50%
2007	153,60%	0,74%	3,41	1,62%	14,00%	50,30%	25,50%	166,81%	0,35%	3,26	0,62%	10,90%	50,20%	17,30%
2008	156,35%	0,65%	3,43	1,30%	11,60%	50,60%	21,80%	166,54%	0,34%	2,79	0,60%	11,40%	51,10%	14,80%
2009	156,35%	0,65%	2,80	1,96%	9,70%	51,30%	17,80%	163,51%	0,34%	2,73	0,63%	12,50%	53,20%	17,90%
2010	151,40%	0,63%	2,80	1,80%	10,80%	51,80%	14,20%	160,48%	0,35%	3,27	0,64%	12,90%	54,70%	15,60%
2011	140,94%	0,49%	3,30	1,73%	8,50%	51,20%	21,50%	152,78%	0,35%	3,49	0,66%	16,40%	48,80%	14,90%
2012	128,83%	0,54%	3,44	1,88%	5,70%	52,00%	24,50%	144,79%	0,36%	4,23	0,73%	22,20%	55,00%	18,40%
2013	121,39%	0,52%	3,07	1,82%	1,80%	51,80%	0,10%	137,08%	0,34%	3,72	0,72%	8,00%	54,80%	0,20%
2014	111,76%	0,41%	2,75	1,27%	12,50%	51,40%	0,10%	130,48%	0,31%	4,23	0,73%	18,90%	54,70%	20,50%
2015	102,13%	0,40%	2,91	1,51%	2,60%	51,20%	45,80%	121,39%	0,33%	3,32	0,73%	16,70%	48,80%	0,10%

Для определения связи между короткими временными рядами (т.е. изменениями величин во времени) можно использовать ограниченный набор методов, например подсчет коэффициента корреляции, который показывает линейную зависимость между рассматриваемыми переменными.

Необходимо отметить, что нулевое или близкое к 0 значение коэффициента корреляции не означает отсутствие связи между временными рядами. В этом случае, может наблюдаться связь более сложной структуры, поэтому может потребоваться применение других, более сложных методов, например причинности по Грейнджеру, как было показано, например в [5].

Пример получившейся матрицы корреляций (для Саратовской области) представлен в табл. 4 ниже.

*Таблица 4. Матрица корреляции для Саратовской области.*

	Фактор 1	Фактор 2	Фактор 3	Фактор 4	Фактор 5	Фактор 6	Фактор 7	Кадастр
Фактор 1	1							
Фактор 2	0,004813	1						
Фактор 3	0,5422	-0,2355	1					
Фактор 4	-0,5923	0,0024	-0,4208	1				
Фактор 5	-0,1255	-0,3541	0,4842	-0,0674	1			
Фактор 6	-0,3282	-0,8058	-0,0056	0,387	0,0671	1		
Фактор 7	0,1764	-0,5036	0,1194	0,2229	0,4677	0,2844	1	
Кадастр.	<b>-0,6996</b>	<b>-0,6755</b>	-0,1886	<b>0,512</b>	0,2576	<b>0,874</b>	0,1711	1

Из матрицы видно, что для Саратовской области существует сильная зависимость между долей земель промышленности и иного назначения и такими показателями инновационного развития как (далее перечисление в порядке убывания модуля коэффициента корреляции): степень износа основных фондов (фактор 6), численностью студентов образовательных учреждений высшего профессионального образования на 10000 человек населения, нормированное на среднее число студентов по регионам РФ (фактор 1), численностью персонала, занятого научными исследованиями и разработками, нормированное на число населения



региона (фактор 2) и внутренними затратами на исследования и разработки в процентах от ВРП (фактор 4). Зависимость между кадастровой информацией и другими факторами мала.

Для Самарской области сильная связь также наблюдается для факторов 1,2 и 6, однако коэффициент корреляции между кадастровой информацией и фактором 4 немного меньше 0.5, что не позволяет говорить о сильной связи.

Для республики Татарстан ситуация обратна: коэффициент корреляции между кадастровой информацией и фактором 6 очень мал в отличие от подобного коэффициента для фактора 4.

В отличие от Поволжья, в Московской области проявляется сильная зависимость между кадастровой информацией и фактором 7 (удельный вес инновационных товаров, работ, услуг, в общем объеме отгруженных товаров, выполненных работ, услуг организаций). В остальном ситуация похожа на Саратовскую область.

Для Ленинградской области характерна зависимость только между кадастровой информацией и фактором 5 (удельный вес организаций, осуществлявших технологические инновации, в общем числе обследованных организаций), что не характерно для других рассмотренных примеров. Коэффициенты корреляции для остальных факторов малы.

Таким образом, исследовав корреляционные матрицы между показателями инновационного развития и кадастровой информацией, была выявлена сильная связь для отдельных показателей. Классификация регионов России по структуре связи, а также определение направления этой связи — направления для дальнейшего исследования.

*Список использованной литературы*

1. Федеральная служба государственной регистрации, кадастра и картографии (Росреестр).

2. «Рейтинг инновационного развития субъектов Российской Федерации. Выпуск 5» / Г.И. Абдрахманова, П.Д. Бахтин, Л.М. Гохберг и др.; под ред. Л.М. Гохберга; Нац. исслед. ун-т «Высшая школа экономики». – М.:НИУ ВШЭ, 2017. – 260 с.
3. Крылов С. Н., Смирнов Д. А., Осипов Г. В., Безручко Б. П. // Письма в ЖТФ Т. 41 №11 (2015) С. 94.
4. Кондратьева О.Ю., Терин Д.В., Ревзина Е.М. Информационные технологии: исследовательские расчеты в среде mathcad. Введение // Учебно-методическое пособие / Mauritius, 2018.
5. Кондратьева Е.В., Кондратьева О.Ю. Экономический анализ эффективности прогнозирования успеваемости на основе FUZZY LOGIC // В сборнике: Экономическая наука в Саратовском университете: прошлое и современность Материалы Международной конференции в рамках Международного научного симпозиума, посвященного 100-летию гуманитарного образования в СГУ "Столетие гуманитарного образования в Саратовском государственном университете: диалог времен - прошедшего, настоящего и будущего". Под редакцией О.Ю. Челноковой. 2017. С. 30-32.

*И.В. Табакова, С.А. Винокурова*

Саратовский национальный исследовательский государственный университет имени Н.Г. Чернышевского

## **ПРИМЕНЕНИЕ FMEA-АНАЛИЗА ДЛЯ РЕАЛИЗАЦИИ РИСК-ОРИЕНТИРОВАННОГО МЫШЛЕНИЯ**

В представленной статье рассмотрена одна из основных задач любой организации в рамках системы менеджмента качества – выявление и оценка рисков, решить данную задачу предлагается посредством применения FMEA-анализа. Авторами проанализированы основные преимущества данного метода по сравнению с другими методами оценки рисков и приведены примеры предприятий, применяющих в своей деятельности данный метод.

**Ключевые слова:** оценка риска, ISO 9001, риск-ориентированное мышление, FMEA-анализ.

Одной из основных задач системы менеджмента качества является обеспечение выявления потенциальных несоответствий и предотвращение их появления на всех стадиях жизненного цикла продукции. Иными словами, для достижения запланированных организацией целей необходимо выявлять всевозможные потенциальные

риски [1].

В новой версии стандарта ISO 9001:2015 (и соответствующего национального стандарта ГОСТ Р ИСО 9001-2015) фигурирует понятие «риск-ориентированного мышления», выступая необходимым условием достижения результативности системы менеджмента качества [2]. Разберем подробнее, что же оно из себя представляет. Прежде всего, риск-ориентированное мышление – это необходимость выполнения определенных мероприятий для управления и контроля рисками в организации. Нельзя сказать, что риск-ориентированное мышление – это абсолютно новое требование. В прежних версиях стандарта ISO 9001 оно присутствовало всегда. Например, в стандарте ISO 9001:2008 было требование осуществления предупреждающих действий, то есть прогнозирования и предотвращения несоответствий. Организации необходимо было обучать работников, планировать работу, распределять полномочия, проводить различные проверки, что является необходимым условием для предотвращения тех самых ошибок. Но предупреждающие действия порой выполнялись не в качестве непрерывного улучшения, а в качестве простого выполнения требования. Именно поэтому риск-ориентированное мышление выделилось в отдельную категорию. Тем самым, организации должны планировать действия в отношении рисков (в соответствии с требованием пунктом 6.1 стандарта ГОСТ Р ИСО 9001-2015) и осуществлять действия в ответ на риски и возможности, а именно систематически выявлять и эффективно устранять риски и определять свои возможности, которые могут повысить их способность поставлять соответствующие требованиям продукцию и услуги [3].

В целом, риск – это опасность; риск – это возможность различного рода потерь при наступлении неблагоприятных событий. Понятие «риск» включает в себя три категории: источник риска, вероятность риска и

последствия. Отмеченное выше требование планирования действий в отношении рисков, безусловно, предусматривает как их идентификацию, так и оценку, позволяющую выделить наиболее значимые риски. Оценка рисков может проводиться как количественными, так и качественными методами. К количественным методам относят использование статистических показателей, анализ чувствительности, а к качественным – использование экспертных оценок, балльный метод, метод аналогий. Но перечисленные методы являются лишь малой частью всех возможных способов оценки рисков.

Итак, перед организацией, желающей иметь результативную систему менеджмента качества, построенную в соответствии с требованиями стандарта ISO 9001, встает необходимость выбора методологии для реализации риск-ориентированного мышления. С одной стороны, есть целый набор методов и концепций (качественных и количественных), позволяющих обнаружить риски, выделить наиболее существенные из них и наметить соответствующие предупреждающие действия. С другой стороны, часто какой-то метод может быть направлен лишь на обнаружение рисков, а для оценки необходимо использовать уже совсем другой.

На наш взгляд, одним из наиболее подходящих для решения поставленной задачи методом является анализ видов и последствий потенциальных отказов – FMEA. Целью данного анализа является обнаружение места возможного нахождения отказа продукции или услуги, а также определение действий, которые могут устранить или уменьшить вероятность их возникновения. В настоящее время не менее 80% разработок технических изделий и технологий проводится с применением FMEA-анализа. Метод удобен тем, что процедура его представляет собой комплекс действий, включающий идентификацию

несоответствий, их причин и последствий; количественную оценку последствий; ранжирование несоответствий и их причин и планирование корректирующих и предупреждающих действий для снижения рисков; количественную оценку эффективности этих действий и документирование всех мероприятий [4].

Приоритетность использования выбранного метода обуславливается также такими преимуществами FMEA-анализа по сравнению с остальными методами, как его универсальность, а также простота и наглядность, которые позволяют привлекать к процессу анализа специалистов разного профиля, что облегчает всесторонний охват проблемы и улучшает информационный обмен между службами предприятия. Важным является также и то, что в качестве объектов FMEA-анализа могут выступать как конструкции изделий, так и процессы.

Отмеченная выше универсальность данного метода легко подтверждается фактами его использования в самых различных областях: от производственных отраслей, таких как авиационная и космическая промышленность, машиностроение, строительство, пищевая промышленность, до непромышленных – образования, менеджмента и маркетинга. Примерами организаций, применяющих данный метод, являются ОАО «ПО Красноярский завод комбайнов» (производство комбайнов «Енисей» всех модификаций) [5], ОАО «Казанский жировой комбинат» (производство кетчупа), ПАО «ОДК-Сатурн» (производство двигателей для авиации) и многие другие. Если говорить, например, о применении данного метода для повышения качества и эффективности работы научно-исследовательских лабораторий, то алгоритм может быть применен для всего спектра лабораторий, вне зависимости от их специализации. При применении FMEA-анализа в образовании могут

быть отдельно рассмотрены процессы, непосредственно связанные с образовательной деятельностью, например проведение учебных занятий или организация промежуточной (итоговой) аттестации, и некоторые управленческие процессы, например анализ СМК образовательной организации и т.п.

Безусловно, FMEA-анализ имеет и ряд недостатков, например субъективность экспертной оценки при выставлении баллов значимости, возникновения и обнаружения определенного дефекта, или необходимость выбора методологии для согласования мнений экспертов, но в целом преимущества данного метода представляются более значительными, чем недостатки. Отметим также, что метод FMEA следует применить как можно раньше, по крайней мере, до начала производства (оказания услуг). Однако его применение является полезным и для изготовленной продукции (оказанной услуги) и функционирующего процесса.

Таким образом, применение анализа видов и последствий потенциальных отказов представляет организации возможность реализации риск-ориентированного мышления, позволяя идентифицировать, оценить и максимально предотвратить потенциальные риски. Более того, этот анализ позволяет осуществить постоянное улучшение качества, ведь его методология предусматривает проведение мероприятий по улучшению для предотвращения рисков, в первую очередь наиболее критических, а затем и для всех выявленных. Отмеченная универсальность FMEA-анализа подтверждается его успешным применением в различных отраслях, как производственных и непроизводственных.

*Список использованной литературы:*

1. Всеобщее управление качеством: учебник для вузов / под ред. О. П. Глудкина. М.: Радио и связь, 1999. 600 с.
2. ГОСТ Р ИСО 9001-2015. Системы менеджмента качества. Требования. М. : Стандартиформ, 2015. 32 с.
3. Риск-ориентированное мышление по ISO 9001:2015 [Электронный ресурс] // Системы менеджмента – консультации и обучение онлайн [Электронный ресурс] : [сайт]. URL: <http://managementsystemsonline.blogspot.ru/2015/11/risk-orientirovannoe-myshlenie.html#more> (дата обращения: 23.03.2018). Загл. с экрана. Яз. рус.
4. ГОСТ Р 51814.2-2001. Системы качества в автомобилестроении. Метод анализа видов и последствий потенциальных дефектов». М. : Стандартиформ, 2006. 23 с.
5. Еремцова С. В. Актуальность проведения FMEA-анализа на ОАО «ПО КЗК» / С. В. Еремцова // Актуальные проблемы авиации и космонавтики. 2011. С.275-276.

## **ОБРАЗОВАНИЕ**

*О.Я. Белобровая, В.П. Полянская, Д.В. Терин, С.Б. Вениз*  
Саратовский национальный исследовательский государственный  
университет имени Н.Г. Чернышевского

### **ЛАБОРАТОРИЯ МИКРОЭЛЕКТРОНИКИ ВЧЕРА И СЕГОДНЯ**

Лаборатория микроэлектроники была создана решением Правительства в декабре 1962 г. как проблемная лаборатория микроэлектроники СГУ. Позднее лаборатория вошла в структуру НИИМФ СГУ. В настоящее время лаборатория микроэлектроники относится к факультету нано- и биомедицинских технологий (ФНБМТ). Лаборатория микроэлектроники (общая площадь 219 кв.м) располагалась до 2017года в торцевом крыле бывшего химического павильона СГУ.

Основным научным направлением лаборатории микроэлектроники в период образования являлось исследование связей электрофизических и электродинамических (оптических) свойств полупроводниковых материалов и структур и композитов на их основе в широком диапазоне частот, как при комнатной температуре, так и в условиях получения (выращивания, осаждения, модификации, травления, синтеза, легирования) структур.

Создание собственной уникальной технологической базы и широкой кооперации с ведущими исследовательскими организациями промышленности и АН позволило осуществлять проверки разрабатываемых методов и средств и получения новой научной информации.

Реализация и исследование возможностей создаваемых методов были бы невозможными без создания новых средств контроля, разрабатываемых непосредственно лабораторией.



Бессменным научным руководителем лаборатории микроэлектроники НИИМФ СГУ до 2015 года являлся Давид Исакович Биленко. Ему принадлежали оригинальные труды по созданию неразрушающих методов контроля материалов и структур. Цикл работ, посвященный поиску и разработке методов неразрушающего определения и контроля свойств материалов и структур, в 1972 г удостоен первой премии Президиума АН СССР за лучшие работы организаций АН СССР, вузов и промышленности по проблемам микроэлектроники.



Биленко Д. И. с сотрудниками, 70-ые годы

Начиная с 90-х годов прошлого столетия развитие нанотехнологии определило вектор исследования в лаборатории новых материалов таких, как аморфный и пористый кремний, пришедших на смену двуокиси ванадия и фазовым переходам. Разработанный оригинальный метод многопараметрового контроля наноструктур на основе пористого кремния послужил одной из основ проведения цикла работ, которыми установлены зависимости кинетики образования и свойств пористого кремния от технологических факторов, обнаружены и частично реализованы необычайно высокие сенсорные

свойства структур.



Проведение технологического процесса *in situ*, 90-ые годы

В настоящее время основной целью исследований является изучение свойств микро- и наноструктур кремния при фазовой и структурной модификации излучением широкого диапазона энергий, в частности, модификацией гамма излучением; исследование влияния наночастиц металлов на электрофизические и фотоэлектрические свойства мезопористого кремния при воздействии излучения, близкого по спектру к солнечному АМ-1 и исследование растворимости различных модификаций кремния в воде и биологически активной среде до и после облучения.

Разработки лаборатории защищены восьмидесятью авторскими свидетельствами и патентами. Созданная на основе работ лаборатории аппаратура и методы внедрены в практику исследовательских и промышленных организаций. В ряде случаев разработки лаборатории намного лет превосходили разработки в развитых странах, в качестве примера можно привести методику и аппаратуру контроля образования

локальных структур, методы многопараметрового контроля гетероструктур в ходе молекулярно-лучевой эпитаксии, методы управления излучением на основе структур с фазовыми переходами и др.

По результатам работ защищено 13 кандидатских диссертаций. Лаборатория всегда была связана совместными работами с ведущими институтами нашей страны: Ленинградский ФИЗТЕХ институт, Московский ИРЭ РАН, Институты микроэлектроники Зеленограда, Новосибирска, Горького, Харькова, Одессы, Львова, Вильнюса, Тбилиси, Еревана.

На базе лаборатории в восьмидесятые годы проводились межведомственные совещания по метрике полупроводников совместно с ведущими предприятиями микроэлектроники Зеленограда и Саратова.

Лаборатория является постоянной базой подготовки специалистов, бакалавров и магистрантов. В ряде курсов лекций широко используются результаты, полученные лабораторией и развитая методология исследований и разработок. Непосредственно на современном оборудовании лаборатории силами её сотрудников ставятся и проводятся новые практикумы, в которых ежегодно проходят обучение от 30-ти до 75 студентов. Изданы учебные пособия «Методы и средства контроля процессов и структур *in situ* в 2х ч», «Многопараметровая диагностика микро- и наноструктур», «Эволюция», «Нано- и микросистемы с обратимо перестраиваемым размещением и свойствами элементов».

В настоящее время на базе лаборатории функционируют следующие специализированные практикумы:

1. Методы исследований материалов и процессов
2. Основы технологии низкоразмерных систем

3. Методы исследования, экспертиза материалов и процессов
4. Методы исследования и диагностики материалов и структур
5. Микроэлектроника.
6. Микроэлектроника и наноэлектроника
7. Методы диагностики и анализа микро- и наносистем

В 1998 году по инициативе профессора Биленко Д.И., декана ФНБМТ Венига С.Б. и директора колледжа им. Яблочкова П.Н. Журавлева Н.И. был организован учебно-методический центр непрерывного подготовки на базе физического факультета СГУ и колледжа для обеспечения непрерывной подготовки студентов техникума с последующим обучением на ФНБМТ, физическом, геологическом, географическом (метеорология), КНИИТ факультетах. Сотрудники лаборатории непосредственно участвовали в учебно-методическом процессе обучения, в том числе вели учебные занятия со студентами колледжа им. Яблочкова П.Н., руководили курсовыми и дипломными проектами. Для целей обучения Биленко Д.И. совместно с факультетом иностранных языков и лингводидактики было издано пособие по английскому языку .

Под руководством профессора Биленко Д.И., декана ФНБМТ Венига С.Б. для Института Дополнительного Профессионального Образования (ИДО) СГУ разработана дополнительная профессиональная образовательная программа повышения квалификации (2010-2012) «Проблемы подготовки кадров по приоритетным направлениям науки, техники и критическим технологиям (нанотехнологии: научные основы и эффективное применение в областях техники и в новых областях техники и биомедицине)». В течение 2010-2012 годов сотрудники лаборатории участвовали в организации и проведении лекционных и практических занятий.



Вручение дипломов в ИДО, 2012г

В 2018 году ЛМЭ исполнилось 56 лет. Главным во все периоды жизни лаборатории микроэлектроники являлся коллектив её сотрудников, для которых всегда достижение научного или практического результата было не сопоставимо с внешними личными оценками.

Поэтому нельзя, говоря о лаборатории, не сказать многих тёплых слов, о Смирнове Александре Ивановиче, заведующем лабораторией, о работавших в разные годы Суровове Борисе Сергеевиче, Галишниковой Юлии Николаевне, Лодгауз Валентине Абрамовне, Пылаеве Станиславе Евгеньевиче, Костюниной Галине Петровне, Меликове Анатолии Арменаковиче, Григорьеве Анатолии Аврамовиче, Куцевляке Петре Ивановиче, Дружининой Татьяне Юрьевне, Ципорухе Викторе Давыдовиче, Абаньшине Николае Павловиче, Казановой Неле Петровне, Колдобановой Ольге Юрьевне, Мысенко Инне Борисовне, Мельниковой Татьяне Евгеньевне и ныне принимающих участие в работах лаборатории Жарковой Эльвире Александровне, Хасиной Евгении Иосифовне, Терине Денисе Владимировиче, Полянской Валентине

Петровне, Белобровой Ольге Яковлевне, Галушка Викторе Владимировиче.



Лаборатории микроэлектроники 50 лет

Ныне ЛМЭ располагается в стенах колледжа радиоэлектроники. Отличительной особенностью работы лаборатории, развиваемой в течение всего времени её существования профессором Биленко Д.И. является комплексный характер проводимых исследований, продолжаемый в настоящее время и в будущем.

*Список использованной литературы*

1. Биленко Д.И., Галушка В.В., Жаркова Э.А., Мысенко И.Б., Терин Д.В., Хасина Е.И. Фотоэлектрические и фотовольтаические свойства структур на основе мезопористого кремния, пассивированного железом // Физика и техника полупроводников. 2014. Т. 48. № 10. С. 1405-1408.
2. Биленко Д.И., Белобровая О.Я., Галушка В.В., Карсакова Я.Д., Мельникова Т.Е., Мысенко И.Б., Полянская В.П., Терин Д.В. Влияние воды и биологически активной среды на различные модификации кремния // Физика и техника полупроводников. 2015. Т. 49. № 3. С. 336-341.Роках А.Г., Биленко Д.И., Шишкин

3. М.И., Скапцов А.А., Вениг С.Б., Матасов М.Д. Оптические спектры пленок cds-pbs и возможность фотоэффекта в среднем инфракрасном диапазоне // Физика и техника полупроводников. 2014. Т. 48. № 12. С. 1602-1606.
4. Galushka V.V., Bilenko D.I., Terin D.V., Revzina E.M., Kondratieva O.Y., Kozhevnikov I.O. Controlled investigation of mass transfer in nanostructures AGI-AG // BioNanoScience. 2015. Т. 5. № 4. С. 227-232.
5. Биленко Д.И., Галушка В.В., Жаркова Э.А., Сидоров В.И., Терин Д.В., Хасина Е.И. Влияние гамма-излучения малых доз на электрофизические свойства мезопористого кремния // Письма в Журнал технической физики. 2017. Т. 43. № 3. С. 57-63

*С.А. Ворошилов, Е.Н. Дубовская, А.Г. Коновалова*

Саратовский национальный исследовательский государственный  
университет имени Н.Г. Чернышевского

## **ПОДГОТОВКА СПЕЦИАЛИСТОВ В ОБЛАСТИ КАЧЕСТВА В САРАТОВСКОМ УНИВЕРСИТЕТЕ**

В настоящее время многие организации России внедрили и сертифицировали системы менеджмента качества (СМК) по модели международных стандартов ISO 9000 и продолжают работы по их совершенствованию. Поддержку функционирования СМК осуществляют специалисты по управлению качеством, как правило, с высшим образованием. В нашей стране подготовка специалистов в этой области началась после утверждения в 1998 году государственного образовательного стандарта высшего профессионального образования «Управление качеством».

В Саратовской области лидером среди вузов по развитию работ в области менеджмента качества выступил Саратовский государственный университет, который параллельно с совершенствованием собственной системы управления качеством



приступил к подготовке специалистов в области качества.

В 1999 г. при поддержке СГУ было создано Саратовское отделение Европейского центра по качеству «Качество жизни» (СО ЕЦК), деятельность которого направлена на распространение знаний и опыта в области менеджмента качества и оказание методической поддержки предприятиям и организациям Саратовской области в разработке, внедрении и улучшении систем менеджмента качества. В 2000 году ряд преподавателей и сотрудников СГУ прошли обучение в СО ЕЦК и получили дипломы о присвоении квалификации по менеджменту качества отделения «Высшая школа» Академии проблем качества РФ, что позволило в последующем открыть новое направление подготовки специалистов.

В 2000 году Саратовский государственный университет имени Н.Г. Чернышевского (СГУ) лицензировал право на подготовку специалистов по специальности «Управление качеством» и в 2001 году осуществил первый набор на очную форму обучения по этой специальности. Инициаторами и активными участниками открытия данной специальности были Скляр Ю.А., Науменко Г.Ю., Ворошилов С.А.

В 2003 г. в СГУ был создан учебно-научный центр управления качеством и педагогических измерений (УНЦ УКПИ), основной целью которого являлась организационное, методическое и технологическое обеспечение процессов подготовки специалистов, в частности, путем разработки, внедрения и обеспечения функционирования СМК СГУ. Произведенные УНЦ УКПИ разработки позволили перейти к форсированному внедрению СМК на основе международных стандартов ИСО 9000. В 2005 СГУ было создано управление менеджмента качества, реорганизованное в 2007 году в управление обеспечение качества, а с 2013 году – в центр менеджмента качества.



Основу центра менеджмента качества составляют выпускники СГУ по специальности (направлению) «Управление качеством».

В 2008 году проведено повышение квалификации 13 преподавателей СГУ по программам Европейской организации по качеству с подтверждением квалификации в Российской и Европейской системах аттестации специалистов в области качества (представители институтов, факультетов и колледжей). На этапе внедрения процедуры внутреннего аудита именно из этих сотрудников назначались руководители аудиторских групп (как наиболее подготовленных).

В 2009 году СМК СГУ впервые была сертифицирована на соответствие требованиям стандарта ГОСТ Р ИСО 9001-2008 применительно к образовательной деятельности. В 2010 году в рамках первого инспекционного контроля область сертификации СМК была расширена на научные исследования и разработки. В 2012 г. и 2015 г. проведена ресертификация СМК на соответствие требованиям ГОСТ Р ИСО 9001-2008 и ГОСТ ISO 9001-2011. В настоящее время область сертификации СМК СГУ распространяется на образовательную деятельность, научные исследования и разработки, измерения и испытания [1,2].

Сотрудники СГУ неоднократно выступали на Совете ректоров области, совещаниях в Министерстве образования области о необходимости и особенностях развития работ по внедрению СМК в системе образования Саратовской области, регулярно участвуют в конференциях и совещаниях по вопросам управления качеством;

По вопросам научного и методического обеспечения работ в области менеджмента качества СГУ поддерживает тесные связи с Академией проблем качества РФ, Европейским центром по качеству, ведущими

вузами России, а также органами по сертификации систем менеджмента качества.

С 2005 года подготовка специалистов в области качества осуществляется на факультете nano- и биомедицинских технологий и организует ее кафедра материаловедения, технологии и управления качеством, которой руководит Вениг С.Б. С 2009 года начато обучение по заочной форме, а в 2014 году лицензирована подготовка магистров по направлению «Управление качеством» и в 2015 году осуществлен первый набор на этот уровень подготовки.

В 2015 году СГУ отметил несколько знаменательных дат, связанных с подготовкой специалистов в области качества:

- 10 лет факультету nano- и биомедицинских технологий СГУ;
- 15 лет подготовки в СГУ по специальности/направлению «Управление качеством»;
- 10-й выпуск специалистов/бакалавров по специальности/направлению «Управление качеством».

Всего с 2001 по февраль 2018 года по специальности/направлению «Управление качеством» в СГУ всего было подготовлено 277 выпускников специалитета и бакалавриата, из них 230 выпускников очной формы обучения и 47 заочной формы обучения. Кроме того, в рамках трех направлений магистратуры подготовлено 11 магистров, из них по направлению «Педагогическое образование» (профиль «Управление качеством», заочная форма обучения) - 5 человек, по направлению «Материаловедение и технологии материалов» (профиль «Менеджмент высокотехнологичного инновационного производства и бизнеса», очная форма обучения) – 2 человека, по направлению «Управление качеством» (профиль «Менеджмент качества в инженерной и образовательной деятельности», заочная форма обучения) - 4 человека.

В 2016 году кафедрой материаловедения, технологии и управления качеством было проведено исследование удовлетворенности и трудоустроенности выпускников очной формы обучения 2001-2015 г.г. по специальности/направлению «Управление качеством» с использованием в качестве средств поиска и коммуникации социальных сетей (ВКонтакте, Одноклассники, Facebook) и разработанных анкет. При оценке удовлетворенности респондентам предлагалось оценить по пятибалльной шкале свою удовлетворенность по различным показателям и дать ответы в развернутой форме по вопросам об областях и дисциплинах, в которых требуется проведение улучшений. Вопросы о трудоустроенности выпускников были направлены на получение информации о месте из работы, направлении деятельности и занимаемой должности. Разные вопросы предполагали выбор из предложенных вариантов ответа, свой вариант ответа либо ответ в развернутой форме. Результаты анкетирования хранились и обрабатывались с помощью программного продукта Microsoft Excel. Для оценки удовлетворенности выпускников применялся метод расчета интегрального индекса удовлетворенности [3].

В опросе приняло участие 102 респондента, что составляет 54,6% от общего числа выпускников очной формы обучения (187 человек). Анализ данных показал, что на момент опроса 82,35% от общего количества респондентов были трудоустроены. Из них наименьшая доля работающих наблюдалась среди выпускников 2010, 2014 и 2015 годов, а максимальная доля - среди выпускников 2007, 2009 и 2012 годов (Рисунок 1).

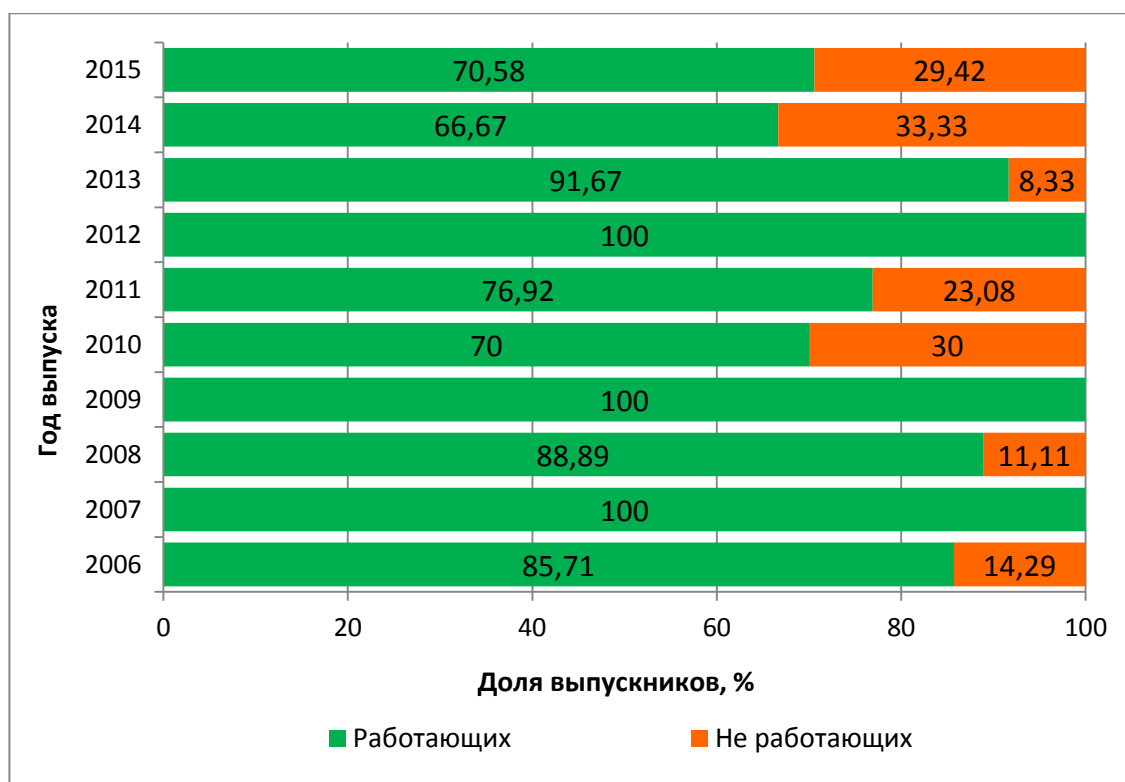
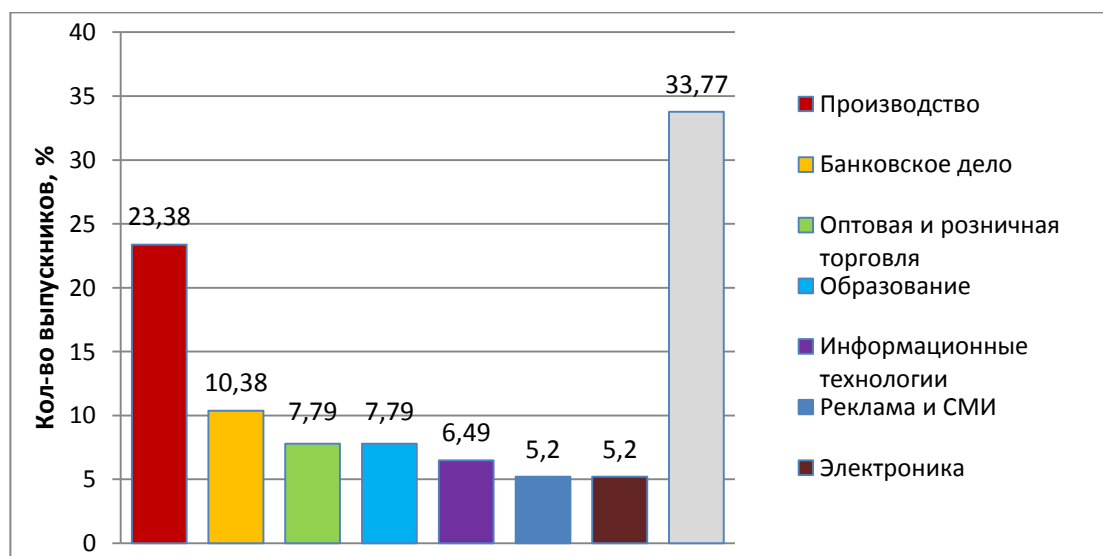


Рисунок 1 – Распределение работающих и не работающих респондентов по годам выпуска

Данные о сферах деятельности выпускников, принявших участие в опросе, приведены на рисунке 2. В других сферах деятельности работают 33,77 % (сертификация, строительство, здравоохранение, сельское хозяйство, культура и спорт и др.)



## Рисунок 2 – Распределение респондентов по сферам деятельности

По данным опроса (таблица 6) 9,87 % респондентов являются руководителями высшего звена, 11,11 % – руководителями среднего звена, 22,22 % – руководителями нижнего звена, 25,93 % – инженерами, 4,94 % – специалистами, 7,41 % – рабочими, занимают другие должности – 18,52 % (менеджеры по продажам, работе с клиентами, служащие и др.). Наибольшее количество респондентов (30,11%) занимаются менеджментом качества, доля занятых по другим направлениям колеблется от 1% до 11%. Эти результаты говорят о том, что выпускники по специальности/направлению «Управление качеством» имеют разностороннее образование, которое позволяет им работать по широкому кругу направлений.

Результаты оценки удовлетворенности качеством образования, полученным в СГУ по специальности/направлению «Управление качеством» (вопрос 2), показали, что 75,5 % удовлетворены и полностью удовлетворены им, 13,73 % затруднились ответить, остальные - не удовлетворены. При этом приобретенным уровнем теоретической подготовки удовлетворено подавляющее большинство респондентов (91,17 %), а приобретенным уровнем практических умений и навыков удовлетворены удовлетворено 78,43 %. Интегральный индекс удовлетворенности выпускников составил 77,76, что соответствует среднему уровню удовлетворенности. Его повышение возможно в первую очередь за счет повышения уровня удовлетворенности приобретенными умениями и навыками. В качестве областей улучшения процесса подготовки специалистов большая часть респондентов (71,83 %) указала необходимость увеличения практических занятий, в частности, по разработке и внедрению систем менеджмента качества, выполнение производственных практик в организациях.

В настоящее время учебным планом по направлению 27.03.02 «Управление качеством» с профилем подготовки «Системы менеджмента качества инновационных организаций» предусмотрены следующие типы практик:

- Учебная практика:
  - Практика по получению первичных профессиональных умений и навыков.
  - Учебная вычислительная.
- Производственная практика:
  - Технологическая практика.
  - Практика по получению профессиональных умений и опыта профессиональной деятельности.
  - Преддипломная практика.

Практика по получению первичных профессиональных умений и навыков проводится в структурных подразделениях АО «НЕФТЕМАШ» - САПКОН, ООО «ТехноТерм-Саратов», а также в центре менеджмента качества СГУ.

Учебная вычислительная практика проводится в лекционной аудитории факультета нано- и биомедицинских технологий СГУ, оснащенной интерактивной доской либо мультимедийным проектором, и в компьютерных классах, оснащенных достаточным количеством персональных компьютеров с необходимым лицензионным программным обеспечением и выходом в Интернет.

Технологическая практика проводится в структурных подразделениях АО «НПЦ «АЛМАЗ – Фазотрон», АО «НПП «Алмаз», Саратовское УФАС России, ЗАО «Фирма Евросервис», Торгово-промышленная палата Саратовской области, Энгельская ТЭЦ-3 филиала «Саратовский» ПАО «Т Плюс», ГУП СО «Облводоресурс» -

«Аткарский», ООО «Техник», ООО «Альфастрой»», а также в следующих структурных подразделениях СГУ - кафедра материаловедения, технологии и управления качеством, учебно-научная лаборатория технологии материалов и покрытий факультета нано- и биомедицинских технологий, лаборатории департамента нанотехнологий образовательно-научного института наноструктур и биосистем, центр менеджмента качества.

Практика по получению профессиональных умений и опыта профессиональной деятельности и преддипломная практика проводятся в сторонних организациях на основе договоров, а также в следующих структурных подразделениях СГУ - кафедра материаловедения, технологии и управления качеством, учебно-научная лаборатория технологии материалов и покрытий факультета нано- и биомедицинских технологий, лаборатории департамента нанотехнологий образовательно-научного института наноструктур и биосистем, центр менеджмента качества.

Все помещения, в которых проводится все типы практик оснащены компьютерной техникой, наглядными демонстрационными материалами, мультимедийными установками и др. оборудованием.

Преподаватели кафедры материаловедения, технологии и управления качеством и студенты, обучающиеся по направлению «Управление качеством», активно участвуют в российских и международных конференциях, конкурсах и олимпиадах, посвященных различным аспектам менеджмента качества. Так, в 2016 году команда студентов заняла 1 место во Всероссийской студенческой олимпиаде по управлению качеством имени В.В. Бойцова (г. Курск). В апреле 2017 года команда студентов стала серебряным призером в финале Всероссийской студенческой олимпиады «Системы качества» (г. Казань)

в которой участвовало 17 команд со всей страны (из Санкт-Петербурга, Казани, Оренбурга, Тамбова, Рязани, Чебоксар, Москвы, Твери, Воронежа, Саратова, Иванова, Екатеринбургa и Перми). При этом некоторые студенты завоевали и высшие награды в отдельных номинациях.

#### *Список использованной литературы*

1. Чумаченко А.Н., Вениг С.Б., Ворошилов С.А., Елина Е.Г., Захарова Т.Г. В центре внимания СМК: опыт Саратовского государственного университета // Стандарты и качество, 2015, № 11(941), С.40-41.
2. Особенности системы менеджмента качества национального исследовательского университета /Ворошилов С.А., Данилова М.К., Дубовская Е.Н., Шакина Е.О. //Менеджмент качества и менеджмент информационных систем (MQ&ISM-2012): Материалы международной конференции под ред. д.т.н., профессора В.Н. Азарова, 16-23 сентября 2012 г., Австрия, Вена, - М.: Фонд «Качество», 2012. – С. 13-17.
3. Рудакова, О. Оценка уровня удовлетворенности населения бытовыми услугами: адаптированная методика / О. Рудакова // Проблемы теории и практики управления. 2011. №1. С 112-117.

***В.А. Соловьева***

Саратовский национальный исследовательский государственный университет имени Н.Г. Чернышевского

### **РАЗЛИЧИЯ В ВОСПРИЯТИИ ИНФОРМАЦИИ НА ЭКРАНЕ – ФИЗИКИ И ЛИРИКИ**

В данной работе анализируется, каким образом один из дидактических принципов – принцип доступности, может быть реализован при построении образовательной интернет-среды. Для этого предлагается использовать технологию Eye-tracking, позволяющую отслеживать характер визуального взаимодействия обучающегося с образовательным текстом на экране, тем самым делая шаг в сторону анализа протекающих в это время у него когнитивных процессов. Представлены результаты проведенных с помощью данной технологии экспериментов, направленных на поиск различий в восприятии информации между



студентами гуманитарного и естественнонаучного профилей. Это может впоследствии стать базой для формирования образовательных предметных интернет-страниц.

**Ключевые слова:** физики и лирики, восприятие информации, поиск информации, чтение информации, результативность обучения, информация на экране, eyetracking, айтрекинг, система «человек-машина».

Работая с определенной научной проблемой, исследователь из множества возможных выбирает наиболее оптимальный с его точки зрения подход к ее описанию (и, соответственно, ее дальнейшему изучению и решению) – формулируются объект и предмет исследования. В итоге часто изучается не целое, а его разрозненные части. Данная ситуация является следствием используемых нами ресурсов для процесса познания: совокупности условий внешней среды – являющегося нам материального мира, а также мозга, обрабатывающего поступающую извне и от внутренних процессов информацию. В связи с тем, что чем больше и шире изучаемое явление, тем больше мозгу требуется затратить энергии, резервы которой пока ограничены, в научном сообществе применяется закон экономии или принцип бритвы Оккама. Потому исследователь, делая вывод об изученном им предмете, присваивает найденную им закономерность целому – объекту, что будет действительным до того момента, пока не будет доказано обратное. Так формируется каждая отдельная научная отрасль, разбиваясь внутри на множество подразделов, обусловленных выбранными для изучения предметами. Однако скопленное количество фактов и метапредметный анализ все чаще приводят к мысли, что закономерности, выявленные в одной отрасли, успешно могут быть наложены и на процесс в другой. Появляются межпредметные связи, которые существенно обогащают человеческий опыт и позволяют взглянуть шире на изучаемую проблему.

Возьмем в качестве примера педагогику. Являясь самостоятельной наукой, она тесным образом оказывается сопряжена с множеством прочих наук, где объектом изучения является человек: философия, психология, политика, социология, антропология, психофизиология, экономика и пр. Использование наработок и идей из этих областей позволяет сделать педагогический процесс более ориентированным на достижение поставленных перед ней цели и задач – развитие человека путем его обучения и воспитания, что, несомненно, будет прямым образом влиять и на развитие общества.

Как известно из теории управления, нацеленность на результат является основой для разработки эффективных процессов. Потому обучающийся становится тем субъектом, на котором центрируется аксиология и эпистемология педагогики как науки, что наглядно отображают основные дидактические принципы обучения. Один из них – принцип доступности, гласит, что процесс обучения должен строиться с учетом имеющихся у обучающегося особенностей: интеллектуальных, физических, моральных и т.д. Данный постулат касается не только продуманной организации взаимодействия «преподаватель – обучающийся» (сюда включается множество взаимосвязанных факторов: сложность изучаемого материала, метода подачи информации преподавателя, эргономичность аудиторий, учебников, целесообразность используемых наглядных и технических средств, даже время проведения занятия), современные реалии экстраполируют его и на образовательную интернет-среду. В связи с тем, что Интернет сравнительно недавно закрепился как релевантный источник образовательной информации и продолжает наращивать свои возможности в данном направлении, необходимо проанализировать, каковы основные особенности восприятия обучающимся информации с экрана и как эти знания можно

применить для минимизации возникающих рисков и максимизации возникающих положительных эффектов от использования Интернета в образовательной практике.

В данной работе будут представлены результаты двух проведенных на базе лаборатории когнитивной психологии (СГУ им. Н.Г. Чернышевского) экспериментов, нацеленных на изучение закономерностей восприятия обучающимся информации на экране в случае постановки перед ним следующих когнитивных задач:

1) первый эксперимент: поиск ответа на поставленный вопрос в течение заданного времени – полминуты. Выборка респондентов – 120 студентов СГУ им. Н.Г. Чернышевского, преимущественно 1-3 курс (разделены в две подгруппы по направленности обучения: 60 студентов гуманитарного профиля, 60 – естественнонаучного);

2) второй эксперимент: чтение образовательной информации с последующими ответами на вопросы по содержанию только что прочитанного материала (закрытый вопрос с четырьмя вариантами ответа, один из них верный). Время на выполнение задания не было не ограничено. Выборка респондентов – 100 студентов СГУ им. Н.Г. Чернышевского, преимущественно 1-3 курс (также разделены в две выше обозначенные подгруппы по 50 человек в каждой). Для того чтобы минимизировать погрешность в выводах касательно запоминания студентами информации, в каждый вопрос были введены 3 дополнительные модели, одну из которых участник исследования отмечал вместе с выбранным вариантом ответа: «Знал ответ на вопрос ранее», «Запомнил при изучении ресурса», «Отвечал интуитивно».

Эксперимент был построен на использовании бесконтактной технологии Eye-tracking, с помощью которой были записаны основные окуломоторные характеристики обучающихся, которые в свою очередь

являются своеобразным проводником к когнитивным процессам испытуемого. Уже сейчас в научном пространстве данная технология активно используется для анализа процессов восприятия – чтения, поиска, перевода текста, выполнения тестовых заданий, принятия решений. Если попытаться кратко охарактеризовать идеологию найденных закономерностей, то можно сказать, что сложные тексты, их неэргономичное оформление и неочевидные для обучающегося задачи приводят к усложнению когнитивного процесса (что выражается, например, в снижении числа и частоты фиксаций и увеличении их длительности).

Результаты проведенного эксперимента будут представлены в разрезе наблюдаемых различий между сформированными подгруппами: студентами гуманитарных и естественнонаучных направлений. Но прежде стоит пояснить, почему было принято решение о проведении исследования в данном направлении. Поступая в образовательные организации высшего образования, обучающиеся дифференцируются по своим предпочтениям – точные или гуманитарные науки. В данной стратификации заложено объективно существующее различие между ними в способе работы с информацией, а также в особенностях мыслительного процесса. В силу вступает дискурс о физиках и лириках, который в том числе следует учитывать и при построении образовательного процесса. Для начала рассмотрим существующие между ними различия.

Согласно М.П. Игнатовой у физиков более развито левое полушарие головного мозга, которое последовательно обрабатывает темпоральную информацию и «настроено» на процедуру поэтапного рационального мышления; у лириков – правое, настроенное на эмоциональное восприятие целостных образов [1]. Если подвести под

общий знаменатель, можно сказать, что причиной подобной «настройки» является объект, с которым в дальнейшем придется работать выпускнику. Физики или студенты естественнонаучных направлений готовятся к взаимодействию с объектами внешнего мира, подчиняющимися естественным законам природы, что требует аналитического склада ума, рациональности в вынесении суждений, так как большая точность высказываний дает возможность наилучшим образом описать условия и полученные результаты проведенного исследования. Лирики или студенты гуманитарных направлений прежде всего работают с человеком и создаваемыми им концептами и конструктами, такими как «общество», «социальное взаимодействие», «язык», «мышление». Человеческая деятельность одновременно и более проста, чем природные процессы, так как исследователь так или иначе погружен в общий дискурс вопроса и является генератором формируемых в нем смыслов, и при этом зачастую менее предсказуема, так как субъективна и содержит множество дополнительных слагаемых – например, бессознательные процессы в психике.

Интересно сделанное Jaffe К. наблюдение о различии поисковых стратегий среди ученых: исследователи естественнонаучных направлений активно изучают работы своих коллег, цитируют их и генерируют множество новых научных работ; исследователи гуманитарных направлений – более изолированы, реже цитируются [2]. В целом, это вполне объяснимо с экономической точки зрения: взаимоинтеграция наук позволяет достигать синергии в решении поставленных задач, что было осознанно прежде всего в сфере производства, так как рыночная конкуренция заставила искать новые способы делать продукт лучше и дешевле.

Следует уточнить, что описанные выше закономерности

описывают выбранную систему с некоторой допустимой погрешностью, вовсе не обязательно, что студент-гуманитарий не будет склонен к рациональному мышлению.

Далее представлены закономерности по четырем параметрам – времени, морганию, фиксациям и саккадам, выявленные в ходе обработки результатов проведенных экспериментов. Значимость наблюдаемых различий анализировалась с помощью критерия Манна-Уитни.

1) Время выполнения поставленной когнитивной задачи – студентам естественнонаучных направлений в среднем требовалось больше времени на поиск ответа на вопрос, полученные различия могут считаться значимыми. Подобная ситуация наблюдалась и в случае постановки когнитивной задачи, заключающейся в прочтении представленного материала с экрана. Однако студенты гуманитарных направлений в целом хуже справлялись с определением верности высказывания о наличии ответа на вопрос, ответами на вопросы по содержанию только что прочитанного текста (они чаще отвечали неверно и/или наугад).

2) Моргания – среднее значение данного параметра в случае поиска информации – 15 раз/мин., в случае чтения – 17 раз./мин. В выбранном разрезе статистически значимые различия были обнаружены только в случае чтения информации: студенты естественнонаучных направлений реже моргали. Считается, что при чтении чем чаще человек моргает, тем он менее сосредоточен [3]. Возможно, что студенты гуманитарных направлений использовали технику работы с информацией *skipping* или *skimming*, что согласуется и с тем, что они быстрее выполняли задачу, и с тем, что они хуже справлялись с ответами на вопросы. Согласно Orchard L.N. & Stern J.A. [4] характеристикой максимальной

концентрации при чтении является моргание не более 5 раз в минуту. При поиске информации только 25% испытуемых, а при чтении – 15% испытуемых моргали реже установленного минимума (студентов естественнонаучного направления в первом случае было больше в 1,2 раза; во втором – в 1,8 раза, объем выборки не позволяет сделать выводы о достоверности данных различий).

3) Фиксации и саккады (частота и длительность). При поиске информации частота фиксаций и саккад у студентов естественнонаучных направлений оказалась выше, разница статистически значима (по критерию Манна-Уитни). Принято, что при увеличении сложности задачи, частота фиксаций снижается [5]. Потому можно сделать вывод, что студентам гуманитарных направлений было более сложно искать информацию в условиях ограниченного времени, что особенно интересно перекликается с быстротой выполнения ими задания. Прочие проанализированные характеристики не дали статистически значимых расхождений по изученным подгруппам.

В целом, эксперимент позволил обнаружить достоверные различия в восприятии информации на экране между студентами гуманитарного и естественнонаучного профилей. Еще предстоит значительная работа по интерпретации полученных результатов и их адаптации для образовательного процесса, так как пока не разработан четко стандартизированный инструментарий по анализу получаемых с помощью технологии Eye-tracking характеристик и их отнесения к когнитивным процессам.

#### *Список использованной литературы*

1. Игнатова М.П. «Физиики» и «лирики»: две культуры вчера и сегодня // Изв. Саратов. ун-та. Нов. сер. Сер. Философия. Психология. Педагогика. 2015. Т. 15, вып. 3. С. 17-20. doi: 10.18500/1819-7671-2015-15-3-17-20
2. Jaffe K. Social and natural sciences differ in their research strategies, adapted to work for different knowledge landscapes // PLoS One. 2014. 9(11). DOI: 10.1371/journal.pone.0113901

3. Smilek D., Carriere J.S., Cheyne J.A. Out of mind, out of sight eye blinking as indicator and embodiment of mind wandering. *Psychological Science*, 21(6), 2010, P. 786-789. DOI: 10.1177/0956797610368063
4. Orchard L.N., Stern J.A. Blinks as an index of cognitive activity during reading. *Integrative Physiological & Behavioral Science*, 1991, 26, P. 108-116.
5. Барабанщиков В.А., Жегалло А.В. Айттрекинг: Методы регистрации движений глаз в психологических исследованиях и практике: учебное пособие. М.: Когито-центр, 2014. 128 с.

*В.А. Федоренко*

Саратовский национальный исследовательский государственный  
университет имени Н.Г. Чернышевского

### **ПОДГОТОВКА ЭКСПЕРТОВ-КРИМИНАЛИСТОВ НА ФАКУЛЬТЕТЕ НАНО И БИМЕДИЦИНСКИХ ТЕХНОЛОГИЙ**

В представленной статье рассмотрены результаты исследований, проведенных учебно-научной лабораторией криминалистического материаловедения, обеспечивающей научную и учебно-методическую поддержку обучения магистров по профилю «Криминалистическое материаловедение». Проведенные исследования в области судебной баллистики демонстрируют, что современные эксперты должны обладать компетенциями, в первую очередь, в области материаловедения, естественных наук, информатики и математики.

**Ключевые слова.** Экспертиза, продукты выстрела, идентификация оружия, дескрипторы, контурный анализ.

Актуальной проблемой криминалистических экспертиз, связанных с исследованием веществ, микро и нано частиц, следов на различных материалах, является внедрение современных технологий в их производство. Обусловлено это бурным развитием таких наук, как материаловедение, технологии материалов, информатика, обработка цифровых изображений и т.д. Решение данной задачи не возможно без формирования экспертов нового поколения, обладающих знаниями и компетенциями, прежде всего в области технологий и свойств материалов, математики и информационных технологий.

Следует отметить, что существующая практика подготовки



специалистов по направлению «Судебная экспертиза», включающей такие экспертные дисциплины, как судебная баллистика, дактилоскопия, трасология, исследование холодного и метательного оружия и т.п. в университетах и институтах юридического профиля не позволяет решить проблему формирования эксперта нового поколения по разным объективным причинам, таким, как отсутствие квалифицированных кадров в области материаловедения, отсутствие необходимой технической учебной и научной базы и т.д.

Наиболее близким по компетенциям, предъявляемым к современным судебным экспертам, является подготовка магистров по направлению «Материаловедение и технологии материалов». Поэтому в рамках данного направления был введен профиль обучения «Криминалистическое материаловедение». При обучении по данному профилю формируется широкий спектр компетенций по методам исследования веществ и материалов, методам моделирования, информационным технологиям. На факультете nano и биомедицинских технологий имеется необходимая для успешного обучения лабораторная база и высококвалифицированный профессорско-преподавательский состав.

Одной из важной составляющей подготовки экспертов нового поколения является проведение научных исследований по наиболее актуальным проблемам данной отрасли знаний, внедрение их результатов в учебный процесс, а также привлечение магистрантов к участию в исследованиях в рамках выполнения ими курсовых проектов и выпускных квалификационных работ. Сотрудниками учебно-научной лаборатории криминалистического материаловедения, обеспечивающей научную и учебно-методическую поддержку обучения по профилю «Криминалистическое материаловедение», за последние три года были

проведены различные исследования в области судебной баллистики. В данной в статье кратко представлены результаты двух исследований, на примере которых показан диапазон компетенций, которыми должен обладать выпускник, обучающийся по данному направлению.

**1. Исследование продуктов дальнего выстрела по огнестрельным повреждениям методами растровой электронной микроскопии.** В работе исследовались микрочастицы продуктов выстрела давностью 1, 7 и 15 лет, полученные при стрельбе с близкой и дальней дистанции патронами отечественного и иностранного производства. В отличие от традиционного для судебной баллистики контактно-диффузионного метода, применение растровой электронной микроскопии (РЭМ) позволяет практически неразрушающим способом исследовать как элементный состав микрочастиц, так и их морфологию и получать более объективные и точные данные по расследуемому событию.

При срабатывании капсюльного состава образуется большое количество продуктов сгорания в жидкой фазе, что является необходимым условием для гарантированного воспламенения порохового заряда. Источником жидкой фазы являются продукты взаимодействия горючего и окислителя, химический состав которых включает такие характерные элементы, как **Ba, S, Cl, K, Sn, Sb, Pb, Hg**. При выходе пороховых газов из канала ствола происходит резкое падение давления и температуры продуктов выстрела, что приводит к затвердеванию жидких продуктов разложения капсюльного состава. В результате образуются характерные округлые частицы по форме близкие к сфере размером от 100 нм до 10 мкм (рис.1 а), б)).

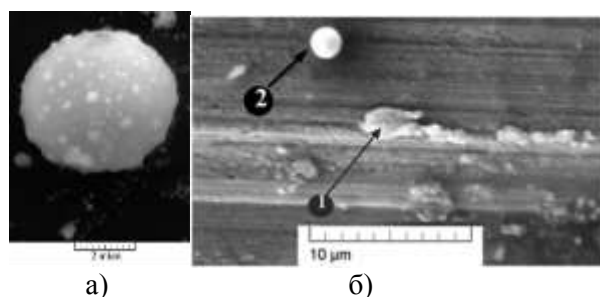


Рис.1. Характерные частицы, образовавшиеся при срабатывании капсюльного состава: а) – частица изъятая с поверхности преграды с огнестрельным повреждением; б) – частицы на поверхности выстреленной пули

Исследования проводились с помощью РЭМ фирмы TESCAN (модель MIRA 2 LMU) с разрешением до 1 нм в режиме высокого вакуума. Система микроанализа позволяет качественно и количественно определять химический элементный состав с выбором исследуемой области (точки). Определение химического элементного состава продуктов срабатывания капсюльного состава и выстрела проводилось методом рентгеноспектрального энергодисперсионного микроанализа. Суть метода заключается в детектировании спектра характеристического рентгеновского излучения, генерируемого в зоне взаимодействия первичного пучка ускоренных электронов с образцом [1].

Исследования показали, что патроны российского производства в основном имеют капсюльный состав оржавляющего типа, а патроны импортного производства – неоржавляющий. Устойчивыми признаками боевых патронов российского производства (за исключением экспортируемых охотничьих патронов к нарезному оружию) является наличие в продуктах инициирования таких элементов, как **Sn** и **K**, а патронов зарубежного производства – **Ba** и **Pb**. Исследование элементного химического состава отдельных микрочастиц с помощью РЭМ позволяет надежно фиксировать присутствие **Sn**, **Sb**, **K**, **Cl** для следов выстрела патронами российского производства, в капсюльный

состав которых входят гремучая ртуть, хлорид калия и антимоний. Исследования следов выстрела патронами зарубежного производства показали, что достаточно надежно выявляются такие элементы, как **Ba** и **Pb**.

Исследования показали: давность выстрела практически не сказывается на выявлении характерных частиц сферической формы диаметром 1-10 мкм с набором элементов, характерных для продуктов выстрела; РЭМ может эффективно и оперативно использоваться для выявления с высокой надежностью микрочастиц продуктов выстрела. Использование результатов исследований в учебном процессе позволяет обучаемым оценить негативное влияние фонового содержания элементов на предметах окружающей обстановки на качество выводов.

*Применение контурного анализа для оценки схожести формы признаков.* Проведение проверок в автоматическом режиме по массивам двумерных цифровых изображений следов бойков огнестрельного оружия является актуальной задачей, связанной с оперативным выявлением связи между местом преступления и конкретным экземпляром оружия. Основным математическим приемом сравнения является нахождение функции взаимной корреляции, которую находят либо для всей поверхности изображений, либо для отдельных частей сравниваемых изображений [2]. Однако данный метод не является оптимальным для анализа в автоматическом режиме признаков в виде пятен произвольной формы.

Изображения следов бойков в градациях серого были получены с помощью баллистического сканера «POISC». Предварительно проводилось выравнивание освещения исходных изображений методом гомоморфной обработки изображений и их преобразование в бинарный вид с помощью адаптивной бинаризации методом Ниблэка. Данный

метод позволяет варьировать порогом бинаризации  $V(x, y)$  от точки к точке в зависимости от локального значения стандартного отклонения  $\sigma(x, y)$ :

$$V(x, y) = \mu(x, y) + k \cdot \sigma(x, y), \quad (1)$$

где:  $\mu$  – математическое ожидание;  $k$  – коэффициент, определяющий, какую часть границы объекта взять в качестве самого объекта.

При бинаризации изображений следов бойков размером 250x250 пикселей использовалось окно размером 51x51 пиксель,  $k=0.2$ . Признаки с малой площадью исключались из анализа, бинарные изображения дополнительно сглаживались (рис. 2 а), б), в)). Для описания бинарных изображений следов бойков использовались следующие дескрипторы выделенных признаков, не зависящие от ориентации изображений: площадь ( $S$ ), периметр ( $P$ ), максимальный и минимальный моменты инерции ( $I_{min}$ ,  $I_{max}$ ). Дескрипторы формируют так называемое признаковое пространство, а сравнение координат признаков ( $S$ ,  $P$ ,  $I_{min}$ ,  $I_{max}$ ) исследуемого следа с соответствующими признаками тестовых изображений позволяет делать предварительную оценку подобия сравниваемых изображений следов.

Для сравнения векторов признаков рассчитывалось Евклидово расстояние в пространстве признаков от исследуемого объекта до каждого тестового:

$$d_j = \sqrt{\sum_{i=1}^M [A_i - B_{ij}]^2}, \quad (2)$$

где:  $A$  и  $B$  исследуемый и тестовый объекты соответственно;  $i$  – номер компоненты вектора признаков (площадь, периметр, и т.д.);  $j$  – порядковый номер объекта из тестового массива.



Рис.2. Бинарное изображение признака в виде пятна неопределенной формы: а) - исходное изображение следа бойка; б) - бинарное изображение следа бойка; в) – бинарное изображение после применения сглаживающей фильтрации.

Исследования, проведенные по массиву из 120 следов бойков с индивидуальными признаками в виде пятен произвольной формы показали, что в приоритетный список, включающий 20% объектов тестового массива, входит «парный» след (след бойка оставлен тем же экземпляром оружия, что и исследуемый) с вероятностью около 99%, если такой присутствует в базе данных. Для дальнейшего сокращения рекомендательного списка проводился анализ отобранных изображений следов по дескрипторам, описывающим форму доминирующих признаков. К таким дескрипторам относятся контуры, построенные по внешней границе выделенных признаков.

Для представления признаков в виде контуров, граница каждого признака описывалась элементарными векторами, которые соединяли точки в соответствии с направлениями 8-связной системы (рис. 3. а). Координатами элементарных векторов являются комплексные числа:  $i$ ;  $1+i$ ;  $1$ ;  $1-i$ ;  $-i$ ;  $-1-i$ ;  $-1$ ;  $-1+i$ . Контуры, кодируемые таким образом (рис. 3 б), обладают следующими замечательными свойствами: максимальное значение модуля нормированного скалярного произведения  $|\eta|$  двух произвольных контуров  $\Gamma$  и  $N$  (3) инвариантно их повороту, положению на плоскости и масштабу. Максимум модуля нормированного скалярного произведения (НСП) указывает на степень сходства контуров, а аргумент указывает на угол их разориентации.

$$|\eta| = \frac{|(\Gamma, N)_{c^k}|}{\|\Gamma\| \|N\|} \quad (3)$$

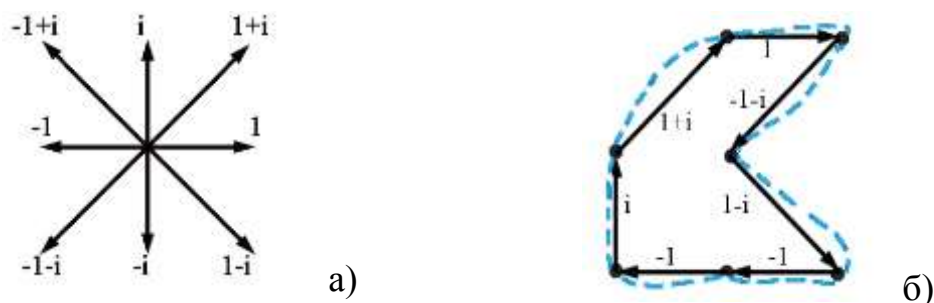


Рис. 3. Кодировка единичными комплексными векторами: а) - система координат; б) - описание границы объекта комплексными координатами, граница объекта обозначена пунктиром

Для оценки эффективности сравнения признаков методом контурного анализа были выбраны следы с близкими значениями дескрипторов  $S$ ,  $P$ ,  $I_{max}$ ,  $I_{min}$ . Расчеты показали, что применение контурного анализа позволяет выделить признаки с близкими по форме контурами и существенно сократить приоритетный список. Вероятность включения парного следа в первую пятерку номеров приоритетного списка составляет порядка 96%.

Представленные в работе исследования иллюстрируют широкий спектр задач, которые приходится решать экспертам в настоящее время. Последнее подтверждает основной тезис данной работы, что для эффективного решения столь разноплановых задач, современный эксперт должен обладать компетенциями, прежде всего, в области материаловедения, естественных наук, информатики и математики.

*Список использованной литературы:*

1. Федоренко В.А., Биленко Д.И., Вениг С.Б., Захаревич А.М., Гвоздкова Л.С. Исследование продуктов дальнего выстрела с помощью растрового электронного микроскопа // Известия Саратовского университета. Новая серия. Сер. Экономика. Управление. Право. – 2012. – Т.12, вып.3. – С. 72-76.

2. Федоренко В.А., Корнилов М.В. Применение методов кластерного анализа для оценки схожести следов бойков// Изв. Саратов. ун-та. Нов. сер. Сер. Экономика. Управление. Право. 2014. Т. 14, вып. 1, ч. 2. С 187-190.



Научное издание

**НАНО- И БИОМЕДИЦИНСКИЕ  
ТЕХНОЛОГИИ.  
УПРАВЛЕНИЕ КАЧЕСТВОМ.  
ПРОБЛЕМЫ И ПЕРСПЕКТИВЫ.**

Сборник научных статей

Выпуск 2

ISBN 978-5-6040675-8-1



Издается в авторской редакции

---

Подписано в печать 26.04.2018 Формат 60 84 1/16.  
Бумага офсетная. Гарнитура Times. Печать офсетная.  
Усл. печ.л. 9,30 (10,0). Уч. изд. л. 6,67. Тираж 100 экз.

---

Издательство «Техно-Декор»  
Саратов, Московская, 160  
Тел. (8452) 77-08-48  
sar-print.ru