**СОДЕРЖАНИЕ****Научный отдел****Физика****Максимова Л. А., Рябухо П. В., Мысина Н. Ю., Рябухо В. П.**

Цифровая спекл-фотография с корреляционной обработкой пространственного спектра спеклограммы для определения микросмещений рассеивающего объекта

5

Астахов Е. И., Усанов Д. А., Скрипаль А. В., Добдин С. Ю.

Автодинная интерферометрия расстояния при модуляции длины волны излучения полупроводникового лазера

12

Башкатов А. Н., Генина Э. А., Кочубей В. И.,**Каменских Т. Г., Тучин В. В.** Оптическое просветление склеры глаза человека водным 30%-ным раствором глюкозы

18

Симоненко Г. В., Студенцов С. А., Ежов В. А.

Жидкокристаллический модулятор на основе волноводного режима в твист-структуре с большим углом закрутки

24

Антонов И. Н., Лавкин А. Г., Мысенко М. Б.,**Ерёмин В. П., Россошанский А. В.** Макет миниатюрного модулятора для СВЧ-приборов

31

Боровкова Е. И., Караваев А. С., Пономаренко В. И.,**Прохоров М. Д.** Сопоставление методов диагностики фазовой синхронизованности по тестовым данным, моделирующим нестационарные сигналы биологической природы

36

Семенов В. В., Вадивасова Т. Е., Шёлль Э., Захарова А. С.

Управление когерентным резонансом с помощью запаздывающей обратной связи. Натурный эксперимент

43

Мельникова В. С., Полищук О. В., Попов В. В.

Полное преобразование поляризации терагерцового излучения массивом графеновых микроленг без использования магнитного поля

51

Приложения**Хроника****Усанов Д. А.** Кафедре физики твердого тела 70 лет

55

Сведения об авторах

62

Решением Президиума ВАК Министерства образования и науки РФ журнал включен в Перечень ведущих рецензируемых научных журналов и изданий, в которых рекомендуется публикация основных результатов диссертационных исследований на соискание ученой степени доктора и кандидата наук

Зарегистрировано в Министерстве Российской Федерации по делам печати, телерадиовещания и средств массовых коммуникаций. Свидетельство о регистрации СМИ ПИ № 77-7185 от 30 января 2001 года. Зарегистрировано в Федеральной службе по надзору в сфере связи, информационных технологий и массовых коммуникаций. Свидетельство о регистрации СМИ ПИ № ФС77-56150 от 15 ноября 2013 года

Индекс издания по каталогу ОАО Агентства «Роспечать» 36015, раздел 39 «Физико-математические науки. Химические науки». Журнал выходит 4 раза в год

Заведующий редакцией

Бучко Ирина Юрьевна

Художник

Соколов Дмитрий Валерьевич

Редактор-стилист

Степанова Наталия Ивановна

Верстка

Ковалева Наталья Владимировна

Технический редактор

Ковалева Наталья Владимировна

Корректор

Крылова Инна Геннадиевна

Адрес редакции:

410012, Саратов, ул. Астраханская, 83

Тел.: (845-2) 51-45-49, 52-26-89

E-mail: izvestiya@sgu.ru

Подписано в печать 9.10.2015.

Формат 60×84 1/8.

Усл. печ. л. 7,44 (8,0).

Тираж 500 экз. Заказ 139-Т.

Отпечатано в типографии

Саратовского университета.

410012, Саратов, Б. Казачья, 112А

© Саратовский государственный университет, 2015

**ПРАВИЛА ДЛЯ АВТОРОВ**

Журнал публикует на русском и английском языках научные статьи по физике, содержащие новые результаты исследований, статьи учебно-методического характера, содержащие инновационную компоненту, статьи по методологии разделов физической науки, статьи, отражающие хронику научных мероприятий и важных событий в жизни физического сообщества. Материалы, ранее опубликованные или представленные для публикации в другие журналы, к рассмотрению не принимаются.

Рекомендуемый объем статьи – до 16 страниц текста, 5 рисунков и 4 таблицы, объемом краткого сообщения – до 6 страниц текста, 2 рисунка и 2 таблицы. Таблицы не должны превышать 20% общего объема статьи.

На русском языке статья содержит: УДК, заглавие, инициалы и фамилии авторов, название их места работы, электронный адрес автора, с которым ведётся переписка, аннотацию (около 12 строк), ключевые слова (не более 15), текст, благодарности и ссылки на гранты, список литературы.

На английском языке необходимо продублировать: заглавие, инициалы и фамилии авторов, аннотацию, ключевые слова.

Редколлегия рекомендует авторам структурировать текст, используя подзаголовки. Текст должен быть набран и напечатан через 1,5 интервала на бумаге формата А4 с полями 2,5 см, шрифт Times New Roman, размер шрифта основного текста – 14, второстепенного (аннотация, ключевые слова, сноски, таблицы, подписи к рисункам, приложения, список литературы, примечания) – 12; все страницы рукописи, таблицы, рисунки, следует пронумеровать. Таблицы и рисунки представляются отдельно от текста, таблица должна иметь заголовки, на обратной стороне рисунка следует указать его номер, фамилию первого автора. Нумерация источников в списке литературы должна соответствовать очередности ссылок на них в тексте, ссылки на неопубликованные работы не допускаются.

Для публикации статьи необходимо представить в редакцию:

– подписанный авторами текст статьи, включая резюме и ключевые слова, таблицы, рисунки и подписи к ним (2 экз.);

– сведения об авторах на русском и английском языках: фамилия, имя, отчество, место работы, должность, ученые степень и звание, служебные адреса и телефоны, адреса электронной почты, указать автора, ответственного за переписку с редакцией (1 экз.);

– файлы всех вышеперечисленных материалов в форме документа Microsoft Word doc или Word docx;

– направление от организации (1 экз.);

– внешнюю рецензию, заверенную в установленном порядке.

Материалы, не соответствующие настоящим правилам, редакцией не рассматриваются.

Почтовый адрес редакции: 410012, г. Саратов, ул. Астраханская, 83, физический факультет, журнал «Известия Саратовского университета. Новая серия. Серия Физика», главному редактору.

Электронный адрес: fizika.sgu@bk.ru; fiz@sgu.ru. Сайт журнала: fizika.sgu.ru

CONTENTS**Scientific Part****Physics**

Maksimova L. A., Ryabukho P. V., Mysina N. Yu., Ryabukho V. P.
Digital Speckle Photography with Correlation Processing of Spatial Spectrum of Specklegram for Determination of Micro Displacement of Scattering Object 5

Astakhov E. I., Usanov D. A., Skripal A. V., Dobdin S. Yu.
Self-mixing Interferometry of Distance at Wavelength Modulation of Semiconductor Laser 12

Bashkatov A. N., Genina E. A., Kochubey V. I., Kamenskikh T. G., Tuchin V. V.
Optical Clearing of Human Eye Sclera by Aqueous 30%-Glucose Solution 18

Simonenko G. V., Studentsov S. A., Ehzov V. A.
The Liquid Crystal Modulator on the Basis of the Waveguide Mode in the Twist Structure with the High Twist Angle 24

Antonov I. N., Lavkin A. G., Mysenko M. B., Eryomin V. P., Rossoshansky A. V.
Model of the Miniature Modulator for Microwave Devices 31

Borovkova E. I., Karavaev A. S., Ponomarenko V. I., Prokhorov M. D.
Comparison of Methods for Phase Synchronization Diagnostics from Test Data Modeling Nonstationary Signals of Biological Nature 36

Semenov V. V., Vadivasova T. E., Schöll E., Zakharova A. S.
Time-delayed Feedback Control of Coherence Resonance. Experimental Study 43

Melnikova V. S., Polischuk O. V., Popov V. V.
Total Conversion of Terahertz Wave Polarization by Graphene Microribbon Array without Magnetic Field 51

Appendix**Chronicle**

Usanov D. A.
70 years of the Department of Solid State Physics 55

Information about the Authors 62



**РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ ЖУРНАЛА
«ИЗВЕСТИЯ САРАТОВСКОГО УНИВЕРСИТЕТА. НОВАЯ СЕРИЯ»**

Главный редактор

Чумаченко Алексей Николаевич, доктор геогр. наук, профессор (Саратов, Россия)

Заместитель главного редактора

Стальмахов Андрей Всеволодович, доктор физ.-мат. наук, профессор (Саратов, Россия)

Ответственный секретарь

Халова Виктория Анатольевна, кандидат физ.-мат. наук, доцент (Саратов, Россия)

Члены редакционной коллегии:

Балаш Ольга Сергеевна, кандидат экон. наук, доцент (Саратов, Россия)

Бучко Ирина Юрьевна, директор Издательства Саратовского университета (Саратов, Россия)

Данилов Виктор Николаевич, доктор ист. наук, профессор (Саратов, Россия)

Ивченков Сергей Григорьевич, доктор соц. наук, профессор (Саратов, Россия)

Коссович Леонид Юрьевич, доктор физ.-мат. наук, профессор (Саратов, Россия)

Макаров Владимир Зиновьевич, доктор геогр. наук, профессор (Саратов, Россия)

Прозоров Валерий Владимирович, доктор филол. наук, профессор (Саратов, Россия)

Усанов Дмитрий Александрович, доктор физ.-мат. наук, профессор (Саратов, Россия)

Устьянцев Владимир Борисович, доктор филос. наук, профессор (Саратов, Россия)

Шамионов Раиль Мунирович, доктор психол. наук, профессор (Саратов, Россия)

Шляхтин Геннадий Викторович, доктор биол. наук, профессор (Саратов, Россия)

**EDITORIAL BOARD OF THE JOURNAL
«IZVESTIYA OF SARATOV UNIVERSITY. NEW SERIES»**

Editor-in-Chief – Chumachenko A. N. (Saratov, Russia)

Deputy Editor-in-Chief – Stalmakhov A. V. (Saratov, Russia)

Executive Secretary – Khalova V. A. (Saratov, Russia)

Members of the Editorial Board:

Balash O. S. (Saratov, Russia)

Buchko I. Yu. (Saratov, Russia)

Danilov V. N. (Saratov, Russia)

Ivchenkov S. G. (Saratov, Russia)

Kossovich L. Yu. (Saratov, Russia)

Makarov V. Z. (Saratov, Russia)

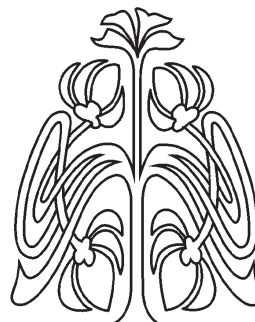
Prozorov V. V. (Saratov, Russia)

Usanov D. A. (Saratov, Russia)

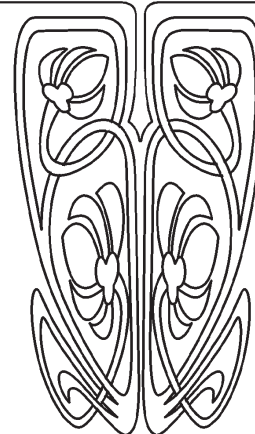
Ustiantsev V. B. (Saratov, Russia)

Shamionov R. M. (Saratov, Russia)

Shlyakhtin G. V. (Saratov, Russia)



**РЕДАКЦИОННАЯ
КОЛЛЕГИЯ**



**РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ ЖУРНАЛА
«ИЗВЕСТИЯ САРАТОВСКОГО УНИВЕРСИТЕТА. НОВАЯ СЕРИЯ.
СЕРИЯ: ФИЗИКА»**

Главный редактор

Усанов Дмитрий Александрович, доктор физ.-мат. наук, профессор (Саратов, Россия)

Заместители главного редактора

Анищенко Вадим Семенович, доктор физ.-мат. наук, профессор (Саратов, Россия)

Тучин Валерий Викторович, доктор физ.-мат. наук, профессор (Саратов, Россия)

Ответственный секретарь

Ревзина Елена Мстиславовна, кандидат физ.-мат. наук (Саратов, Россия)

Члены редакционной коллегии:

Аникин Валерий Михайлович, доктор физ.-мат. наук, профессор (Саратов, Россия)

Бабков Лев Михайлович, доктор физ.-мат. наук, профессор (Саратов, Россия)

Вадивасова Татьяна Евгеньевна, доктор физ.-мат. наук, профессор (Саратов, Россия)

Вениг Сергей Борисович, доктор физ.-мат. наук, профессор (Саратов, Россия)

Виницкий Сергей Ильич, доктор физ.-мат. наук, профессор (Дубна, Россия)

Горохов Александр Викторович, доктор физ.-мат. наук, профессор (Самара, Россия)

Грибов Лев Александрович, доктор физ.-мат. наук, профессор, чл.-корр. РАН (Москва, Россия)

Давидович Михаил Владимирович, доктор физ.-мат. наук, профессор (Саратов, Россия)

Кудряшов Валерий Павлович, доктор техн. наук (Саратов, Россия)

Кузнецов Сергей Петрович, доктор физ.-мат. наук, профессор (Саратов, Россия)

Лёвин Юрий Иванович, кандидат физ.-мат. наук, профессор (Саратов, Россия)

Мельников Леонид Аркадьевич, доктор физ.-мат. наук, профессор (Саратов, Россия)

Нефёдов Игорь Сергеевич, доктор физ.-мат. наук, ст. науч. сотрудник университета Аалто (Хельсинки, Финляндия)

Никитов Сергей Аполлонович, доктор физ.-мат. наук, профессор, чл.-корр. РАН (Москва, Россия)

Резчиков Александр Фёдорович, доктор техн. наук, профессор, чл.-корр. РАН (Саратов, Россия)

Скрипаль Александр Владимирович, доктор физ.-мат. наук, профессор (Саратов, Россия)

Сухоруков Глеб Борисович, профессор Университета Королевы Марии (Лондон, Великобритания)

Трубецков Дмитрий Иванович, доктор физ.-мат. наук, профессор, чл.-корр. РАН (Саратов, Россия)

Филимонов Юрий Александрович, доктор физ.-мат. наук, профессор (Саратов, Россия)

Хлебцов Николай Григорьевич, доктор физ.-мат. наук, профессор (Саратов, Россия)

Шараевский Юрий Павлович, доктор физ.-мат. наук, профессор (Саратов, Россия)

Шиманский-Гайер Лутц, Ph.D, профессор Гумбольдтского университета (Берлин, Германия)

**РЕДАКЦИОННАЯ
КОЛЛЕГИЯ**

**EDITORIAL BOARD OF THE JOURNAL
«IZVESTIYA OF SARATOV UNIVERSITY. NEW SERIES.
SERIES: PHYSICS»**

Editor-in-Chief – Usanov D. A. (Saratov, Russia)

Deputy Editor-in-Chief – Anishchenko V. S. (Saratov, Russia)

Tuchin V. V. (Saratov, Russia)

Executive Secretary – Revzina E. M. (Saratov, Russia)

Members of the Editorial Board:

Anikin V. M. (Saratov, Russia)

Babkov L. M. (Saratov, Russia)

Gorokhov A. V. (Samara, Russia)

Gribov L. A. (Moscow, Russia)

Davidovich M. V. (Saratov, Russia)

Filimonov Yu. A. (Saratov, Russia)

Khlebtsov N. G. (Saratov, Russia)

Kudryashov V. P. (Saratov, Russia)

Kuznetsov S. P. (Saratov, Russia)

Levin Yu. I. (Saratov, Russia)

Nefedov I. S. (Helsinki, Finland)

Nikitov S. A. (Moscow, Russia)

Melnikov L. A. (Saratov, Russia)

Rezchikov A. F. ((Saratov, Russia)

Schimanski-Geier L. (Berlin, Germany)

Sharaevsky Yu. P. (Saratov, Russia)

Skripal A. V. (Saratov, Russia)

Sukhorukov G. B. (London, UK)

Trubetskov D. I. ((Saratov, Russia)

Vadivasova T. E. (Saratov, Russia)

Vinitsky S. I. (Dubna, Russia)

Wenig S. B. (Saratov, Russia)



ФИЗИКА

УДК 535.4:681.7.064.45

ЦИФРОВАЯ СПЕКЛ-ФОТОГРАФИЯ С КОРРЕЛЯЦИОННОЙ ОБРАБОТКОЙ ПРОСТРАНСТВЕННОГО СПЕКТРА СПЕКЛОГРАММЫ ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ МИКРОСМЕЩЕНИЙ РАССЕИВАЮЩЕГО ОБЪЕКТА

Л. А. Максимова¹, П. В. Рябухо², Н. Ю. Мысина¹, В. П. Рябухо^{1, 2}

¹Институт проблем точной механики и управления РАН, Лаборатория проблем когерентно-оптических измерений в точной механике, Саратов

²Саратовский государственный университет

E-mail: MaksimovaLA@yandex.ru

E-mail: ryabukhopeter.optics@yandex.ru

Рассматривается метод цифровой спекл-фотографии для определения смещения спекл-структуры с субпиксельной точностью, вызываемого перемещением или деформацией объекта с рассеивающей поверхностью, с использованием корреляционной обработки суммарного пространственного спектра спекл-структур. Для расширения нижней границы диапазона измерений смещений спекл-структур в область субпиксельных значений предложен метод фазового сдвига интерференционной картины в дифракционном гало, основанный на численно вносимых дополнительных фазовых сдвигах комплексных пространственных спектров смещенной и несмещенной спекл-структур. Представлены результаты численных и натуральных экспериментов.

Ключевые слова: спекл-структура, цифровая спекл-фотография, спекл-интерферометрия, дифракционное гало, пространственный спектр, корреляционный анализ, микросмещение.

Digital Speckle Photography with Correlation Processing of Spatial Spectrum of Specklegram for Determination of Micro Displacement of Scattering Object

L. A. Maksimova, P. V. Ryabukho, N. Yu. Mysina, V. P. Ryabukho

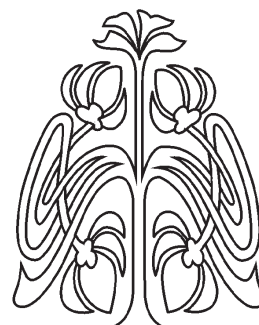
The method of digital speckle photography for determining of speckle pattern displacement with sub-pixel accuracy using correlation processing of summary spatial spectrum of speckle patterns is considered in this article. It is assumed that displacement of speckle pattern is caused by deformation or displacement of an object with a scattering surface. The method of phase shift of interference pattern in diffraction halo is proposed for expanding the lower limit of measuring range of speckle pattern displacement to subpixel values. The method is based on numerical additional phase shifts of complex spatial spectra of displacement and non-displacement speckle patterns. The results of numerical and natural experiments are presented.

Key words: speckle-pattern, digital speckle-photography, speckle-interferometry, diffraction halo, spatial spectrum, correlation analysis, micro displacement.

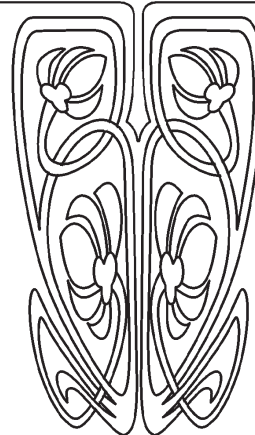
DOI: 10.18500/1817-3020-2015-15-3-5-11

Введение

При отражении когерентного лазерного излучения от рассеивающей поверхности объекта или при прохождении через оптически неоднородную среду формируется спекл-модулированное рассеянное поле [1–4]. При регистрации спекл-поля на фотопластинку или



НАУЧНЫЙ
ОТДЕЛ





матрицу цифровой фотокамеры записывается спеклограмма – распределение интенсивности спекл-поля. Изменения, происходящие с рассеивающими объектами, например микросмещение или деформация его поверхности, отражаются на пространственном распределении интенсивности спекл-поля. С помощью лазерных методов интерферометрии можно определить изменения в спекл-поле и получить измерительную информацию о микросмещениях и деформациях рассеивающих объектов [5–7]. Бесконтактность методов, субмикронное пространственное разрешение и высокое быстродействие определяет широкую перспективу для их использования в прецизионных измерительных технологиях.

При реализации цифровых интерференционных методов спекл-структура рассеянного объектом поля регистрируется на матрицу фотокамеры, межпиксельное расстояние которой в данных методах измерений используется в качестве рабочей меры длины. Однородное поперечное смещение спекл-структуры можно определить с помощью методов цифровой спекл-фотографии по величине линейного фазового набегу, возникающего в поле комплексного пространственного спектра смещенной спекл-структуры [8], или путем анализа интерференционной картины, образующейся в дифракционном гало – в суммарном пространственном спектре исходной и смещенной спекл-структур [5–7]. При определении неоднородного смещения, если выделять области спекл-структуры, в которых смещение квазиоднородно, также возможно применение методов двухэкспозиционной спекл-фотографии.

Непосредственное определение вектора поперечного смещения спекл-структуры возможно методом взаимной корреляции смещенной и несмещенной спекл-структур [9–11]. Использование корреляционного метода для определения взаимного смещения спекл-структур имеет много преимуществ, таких как простота реализации, возможность автоматизации процессов измерения, прямое получение информации о смещении спекл-структуры без преобразования в частотную область. Недостатком такого метода является нечувствительность к смещению спекл-структуры на величину меньшую, чем межпиксельное расстояние матрицы цифровой фотокамеры.

В работе предложены и рассматриваются методы численной обработки и анализа комплексных пространственных спектров спекл-структур для определения их микросмещений в субпиксельном диапазоне. В основе данных методов

лежит численное определение фазового набегу в пространственном спектре с помощью дополнительных численно введенных фазовых сдвигов и корреляционного анализа интерференционной картины в дифракционном гало.

1. Корреляционная обработка пространственного спектра спеклограмм в цифровой спекл-фотографии

При реализации метода цифровой спекл-фотографии на матрицу цифровой фотокамеры регистрируются спекл-структуры рассеянного объектом поля, соответствующие исходному и смещенному положениям поверхности рассеивающего объекта. На рис. 1 представлены возможные схемы реализации метода цифровой спекл-фотографии отражающих объектов с цифровой фоторегистрацией спекл-структур в плоскости действительного изображения поверхности объекта (см. рис. 1, *а*) и в дифракционной области – в ближней или дальней области дифракции (см. рис. 1, *б*). Первая схема используется для регистрации смещения спекл-структуры в результате поперечных смещений и деформаций поверхности объекта, а вторая – для регистрации смещений дифракционных спекл-структур, вызываемых наклоном поверхности, изгибными деформациями и т.п.

Однородное смещение спекл-структуры относительно ее исходного положения вызывает в комплексном пространственном спектре спекл-структуры линейную фазовую модуляцию, зависящую от величины взаимного смещения спекл-структур. Эта фазовая модуляция проявляется в суммарном пространственном спектре исходной и смещенной спекл-структур – в дифракционном гало, в виде системы интерференционных полос (рис. 2, *а*), период и ориентация которых определяется величиной и направлением взаимного смещения спекл-структур [5–7]. Фазовый набег в дифракционном гало, который определяется величиной смещения спекл-структур Δx , можно установить или методом прямого вычисления разности фаз комплексных полей пространственных спектров спекл-структур, или методом определения параметров интерференционной картины, формируемой в дифракционном гало – в поле суммарного пространственного спектра спеклограмм. Последний метод предпочтительнее, поскольку позволяет визуализировать измерительный сигнал путем формирования изображений интерференционной картины и контролировать процесс определения взаимного смещения спекл-структур.

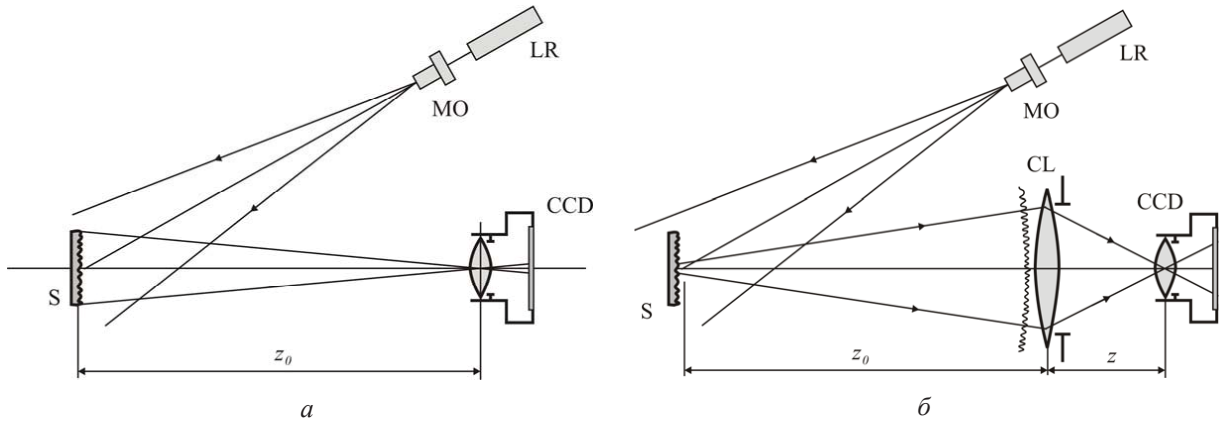


Рис. 1. Оптические схемы записи спеклограмм сфокусированного изображения (а) и дифракционных спеклограмм (б) с использованием цифровой фотокамеры с несъемным штатным объективом: LR – лазер ($\lambda \approx 0.63$ мкм); MO – микрообъектив ($20\times$, $NA = 0.4$); S – объект; CL – коллективная линза ($f \approx 75$ мм); CCD – цифровая фотокамера

Прямое определение смещения спекл-структуры реализуется корреляционным способом [9, 10], но этот метод не даёт субпиксельной точности измерений и не действует в диапазоне субпиксельной величины смещений.

Функции автокорреляции и взаимной корреляции спекл-структур можно записать с использованием следующих выражений:

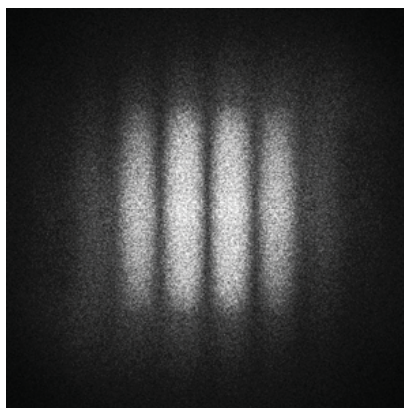
$$\Gamma_0(\Delta x, \Delta y) = \sum_{x=1}^M \sum_{y=1}^N I_0(x, y) I_0(x - \Delta x, y - \Delta y);$$

$$\Gamma_S(\Delta x, \Delta y) = \sum_{x=1}^M \sum_{y=1}^N I_0(x, y) I_S(x - \Delta x, y - \Delta y),$$
(1)

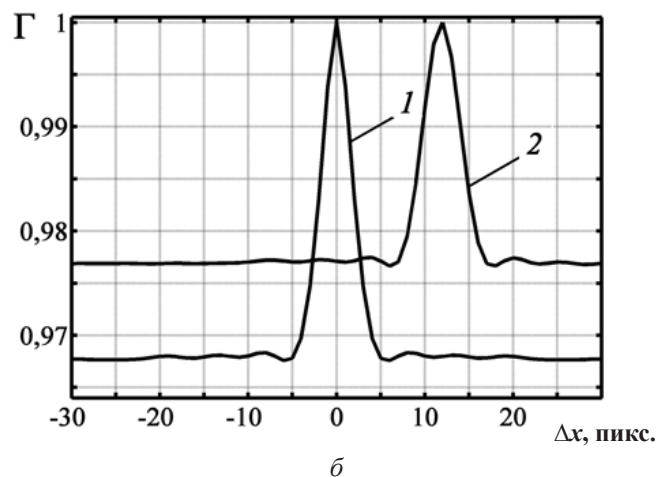
где $I_0(x, y)$ и $I_S(x, y)$ – дискретные функции распределения интенсивности в исходной и сме-

щенной спекл-структурах, (x, y) – дискретные координаты расположения пикселей цифровой матрицы, $(\Delta x, \Delta y)$ – смещения спекл-структуры по соответствующим координатам; $N \times M$ – размер матрицы в количестве пикселей.

На рис. 2, б представлены графики нормированных функций автокорреляции распределения интенсивности исходного состояния спекл-структуры $I_0(x, y)$ и взаимной корреляции распределений интенсивностей исходного и смещённого состояний спекл-структур $I_0(x, y)$ и $I_S(x, y)$. Смещение спекл-структуры в целых числах пикселей можно определить по разности координат между глобальными максимумами этих функций.



а



б

Рис. 2. Интерференционная картина в дифракционном гало (а), полученная в натурном эксперименте ($\Delta x \approx 12,35$ пикс., период полос $\Lambda = 81$ пикс.); график функции автокорреляции распределения интенсивности $I_0(x, y)$ исходного положения спекл-структуры (1) и график функции взаимной корреляции (2) распределений интенсивностей исходного и смещённого положений спекл-структур $I_0(x, y)$ и $I_S(x, y)$ при смещении спекл-структуры вдоль оси X на 12 пикселей (б)



Для определения методом цифровой спекл-фотографии смещения спекл-структуры в субпиксельном диапазоне или с субпиксельной точностью возможно использовать подходы, связанные с формированием и обработкой дифракционного гало – суммарного спектра смещенной и несмещенной спеклограмм. В методе цифровой спекл-фотографии можно проводить анализ распределения модуля комплексной амплитуды поля – в этом отличие цифровых методов от аналоговых, в которых работа проводится только с распределениями интенсивности. Это упрощает обработку данных и даёт существенно более чёткие (узкие) минимумы интерференционной картины.

При достаточно большом смещении спекл-структуры, когда дифракционное гало содержит

несколько и много периодов интерференционных полос (см. рис. 2, *a*), величину периода можно определить непосредственно как расстояние между соседними минимумами интерференционной картины. На рис. 3, *a, б* представлено нормированное распределение модуля комплексной амплитуды поля $H(\xi)$ в дифракционном гало, не усредненное (см. рис. 3, *a*) и усредненное (см. рис. 3, *б*) по 200 строкам в изображении суммарного пространственного спектра спекл-структур вдоль направлений, параллельным интерференционным полосам. В неусредненном распределении (см. рис. 3, *a*) проявляются сильные флуктуации амплитуды поля, обусловленные спекл-модуляцией [12] и существенно снижающие точность определения периода интерференционных полос.

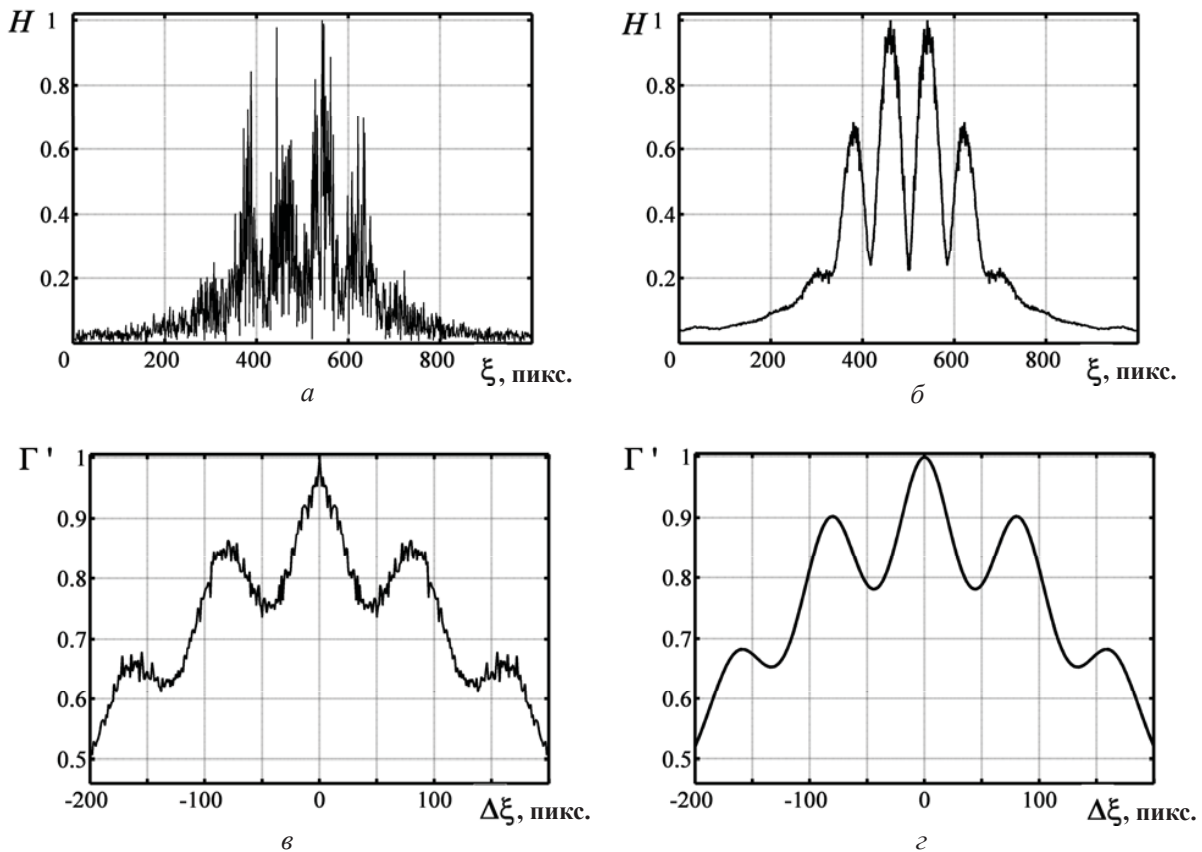


Рис. 3. Распределение амплитуды поля в дифракционном гало (см. рис. 2, *a*) вдоль оси ξ : *a* – не усредненное; *б* – усредненное по 200 строкам изображения суммарного пространственного спектра. Нормированные функции автокорреляции этих распределений амплитуды поля: *в* – не усредненного; *г* – усредненного; смещение спекл-структуры $\Delta x \approx 12.35$ пикс.

Для дифракционного гало, полученного в реальном эксперименте, на графике усреднённого распределения амплитуды (рис. 3, *г*) также проявляются некоторые флуктуации, вызванные спеклами, которые снижает точность определения периода интерференционных полос. В автокорреляционной функции распределения

модуля комплексной амплитуды поля в дифракционном гало случайная модуляция существенно меньше (рис. 3, *в, г*). Это позволяет определить с достаточно высокой точностью величину периода интерференционных полос Λ по разности координат глобальных максимумов автокорреляционной функции (рис. 3, *г*).



Функцию автокорреляции распределения модуля комплексной амплитуды поля в дифракционном гало можно записать с использованием следующего выражения:

$$\Gamma'(\Delta\xi, \Delta\eta) = \sum_{\xi=1}^M \sum_{\eta=1}^N |H(\xi, \eta)| |H(\xi - \Delta\xi, \eta - \Delta\eta)|, \quad (2)$$

где $(\Delta\xi, \Delta\eta)$ – дискретные переменные автокорреляционной функции, $H(\xi, \eta)$ – дискретная функция распределения комплексной амплитуды поля в дифракционном гало – в комплексном про-

странственном спектре разности спекл-структур, (ξ, η) – дискретные координаты – пространственные частоты, расположения пикселей численной матрицы дифракционного гало; $N \times M$ – размер матрицы в количестве пикселей.

Для дискретных распределений комплексной амплитуды поля в пространственных спектрах исходной и смещенной спекл-структур, а также в суммарном пространственном спектре разности исходной и смещенной спекл-структур можно записать выражения [13]:

$$\mathbf{F}\{I_0(x, y)\} = \sum_{x=0}^{M-1} \sum_{y=0}^{N-1} I_0(x, y) \exp\left[i2\pi\left(\frac{x}{M}\xi + \frac{y}{N}\eta\right)\right] = H_0(\xi, \eta);$$

$$\begin{aligned} \mathbf{F}\{I_s(x, y)\} &= \sum_{x=0}^{M-1} \sum_{y=0}^{N-1} I_0(x - \Delta x, y) \exp\left[i2\pi\left(\frac{x}{M}\xi + \frac{y}{N}\eta\right)\right] = H_s(\xi, \eta) = \\ &= H_0(\xi, \eta) \exp\left(i2\pi\frac{\Delta x}{M}\xi\right). \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \mathbf{H}(\xi, \eta) &= \mathbf{F}\{I_0(x, y) - I_s(x, y)\} = \mathbf{F}\{I_0(x, y) - I_0(x - \Delta x, y)\} = \\ &= H_0(\xi, \eta) \left[1 - \exp\left(i2\pi\frac{\Delta x}{M}\xi\right)\right], \end{aligned} \quad (3)$$

где \mathbf{F} – символ пространственного фурье-преобразования, $H_0(\xi, \eta) = \mathbf{F}\{I_0(x, y)\}$ и $H_s(\xi, \eta) = \mathbf{F}\{I_s(x, y)\}$ – комплексные амплитуды пространственных спектров исходной и смещенной спекл-структур.

Таким образом, для модуля комплексной амплитуды суммарного пространственного спектра спекл-структур получаем:

$$|\mathbf{H}(\xi, \eta)| = |H_0(\xi, \eta)| 2 \left| \sin\left(\pi\frac{\Delta x}{M}\xi\right) \right|. \quad (4)$$

Выражение (4) для суммарного амплитудного спектра спекл-структур определяет зависимость периода интерференционных полос от величины взаимного смещения спекл-структур Δx и соответственно позволяет получить выражение для вычисления величины смещения спекл-структуры по величине периода полос, определяемой в результате корреляционной обработки согласно (2) интерференционной картины в дифракционном гало

$$\pi\frac{\Delta x}{M}\Lambda = \pi \Rightarrow \Delta x = \frac{M}{\Lambda}. \quad (5)$$

Определяя $\Lambda = 81$ пикс. по графику на рис. 3, δ для дифракционного гало на рис. 2, a и учитывая размер матрицы $M \times N = 1000 \times 1000$ пикселей, можно определить величину смещения спекл-структуры по формуле (5), $\Delta x \approx$

$\approx 12,35$ пикс. Период интерференционных полос в пространственном спектре определяется с помощью корреляционного метода с точностью до одного межпиксельного расстояния $\delta(\Lambda) \approx \approx 1$ пикс. В этом случае абсолютная погрешность определения смещения спекл-структуры составляет $\delta(\Delta x) \approx (M/\Lambda^2) \delta\Lambda \approx 0,15$ пикс., тогда как корреляционный анализ непосредственно спекл-структур позволяет определить их взаимное смещение только с абсолютной погрешностью $\delta(\Delta x) \approx 1$ пикс.

Таким образом, использование в методе цифровой спекл-фотографии корреляционного анализа суммарного пространственного спектра спеклограмм позволяет уменьшить абсолютную погрешность в определении смещения спекл-структуры до субпиксельных значений.

2. Метод фазового сдвига интерференционной картины в дифракционном гало

При малом смещении спекл-структуры, когда в пределах дифракционного гало оказывается только один минимум интерференционной картины (рис. 4, a), для определения периода интерференционных полос Λ можно использовать метод фазового сдвига интерференционной картины. В этом методе численно задаётся до-



полнительный фазовый сдвиг комплексного пространственного спектра исходной или смещенной спекл-структуры и тем самым задается смещение в целом интерференционной картины

в пределах дифракционного гало на известную часть периода полос, и определяется число отсчетов, соответствующее этой части периода полос.

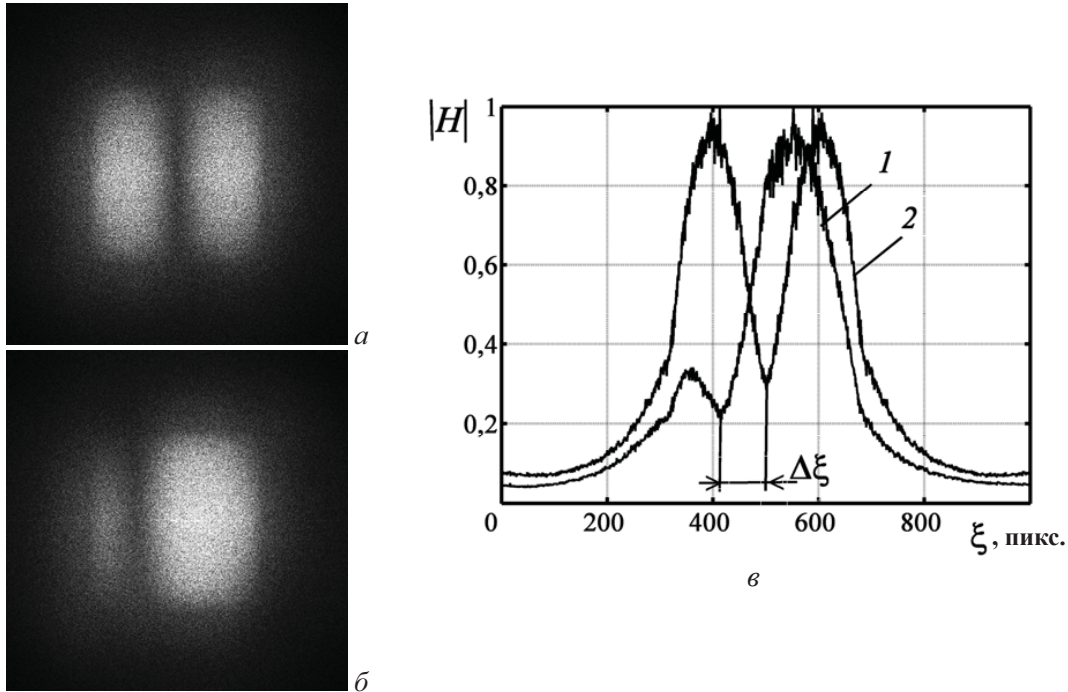


Рис. 4. Интерференционные картины в дифракционном гало: *a* – исходная; *b* – смещённая на четверть периода ($\Delta\phi = \pi/4$); *v* – распределение амплитуды в дифракционном гало вдоль оси ξ , усредненное по 200 строкам интерференционной картины: 1 – исходное; 2 – смещённое на четверть периода полос; $\Delta\xi = \Lambda / 4 = 81$ пикс., $\Lambda \approx 324$ пикс., $\Delta x \approx 3,09$ пикс.

Для численного задания фазового сдвига в пространственном спектре каждый элемент матрицы спекл-структуры необходимо умножить на постоянный фазовый множитель $\exp(i\Delta\phi)$ с заданной величиной фазового сдвига $0 < \Delta\phi < \pi$. В результате численного преобразования Фурье матрицы разности спекл-структур формируется дифракционное гало, в котором минимум (темная полоса) интерференционной картины смещен на часть периода полос $\Delta\xi = (\Delta\phi/2\pi)\Lambda$ (рис. 4, б) относительно исходного положения темной полосы в центре дифракционного гало (рис. 4, а) в отсутствие фазового сдвига $\Delta\phi = 0$. Определяя величину смещения $\Delta\xi$, можно определить период интерференционных полос Λ и, учитывая выражения (5), определить величину взаимного смещения спекл-структур Δx :

$$\left. \begin{aligned} \Lambda &= \frac{2\pi\Delta\xi}{\Delta\phi} \\ \Lambda &= \frac{M}{\Delta x} \end{aligned} \right\} \Rightarrow \Delta x = \frac{M\Delta\phi}{2\pi\Delta\xi} \quad (6)$$

На рис. 4, в представлены графики распределения нормированной амплитуды поля в дифракционном гало (рис. 4, а, б) перпендикулярно полосам, усредненным по 200 строкам в направлении полос. Определяя величину смещения темной интерференционной полосы в дифракционном гало $\Delta\xi$ по распределениям амплитуды (на рис. 4, в), с использованием формулы (6) можно определить величину смещения спекл-структуры Δx с точностью до долей межпиксельного расстояния.

Из анализа рис. 4 четвертая часть периода интерференционных полос ($\Lambda / 4 = 81$ пикс.) определяется с точностью до одного межпиксельного расстояния; размер полного периода $\Lambda \approx 324$ пикс. в данном случае определяется с точностью до четырёх межпиксельных расстояний $\delta\Lambda = 4$ пикс. Подставляя все известные значения в формулу (6), получаем величину смещения спекл-структуры, равную $\Delta x = 3,09$ пикс. В этом случае абсолютная погрешность определения смещения спекл-структуры составляет $\delta(\Delta x) \approx (M/\Lambda^2)\delta\Lambda \approx 0,04$ пикс.



Заключение

Прямой корреляционный анализ взаимного смещения изображений спекл-структур позволяет определить величину смещения с точностью до одного межпиксельного расстояния. Для измерений с субпиксельной точностью или в субпиксельном диапазоне необходимо при реализации метода цифровой спекл-фотографии выполнять численные преобразования спекл-структур в область их пространственных частот и определять период интерференционной модуляции суммарного спектра спекл-структур. Период интерференционных полос в пространственном спектре спекл-структур можно определить корреляционным способом по положению максимумов автокорреляционной функции распределения амплитуды поля в дифракционном гало. Для малых смещений спекл-структуры, когда в дифракционном гало формируется только один минимум интерференционной картины, период интерференционных полос можно определить с помощью метода фазового сдвига, в котором численным способом задаётся смещение центрального минимума интерференционной картины на заданную часть периода интерференционных полос.

Предложенные в работе методы анализа и обработки пространственного спектра спекл-структур позволяют определять смещение спекл-структуры в субпиксельном диапазоне, а также с субпиксельной точностью в интервале относительно больших взаимных микросмещений спекл-структур. Это существенно расширяет диапазон измерений, производимых с помощью метода цифровой спекл-фотографии, в сторону малых величин смещений рассеивающего объекта и может быть эффективно использовано в практике измерения малых смещений и деформаций рассеивающих объектов.

Исследования проведены при частичной финансовой поддержке гранта Президента РФ для государственной поддержки ведущих научных школ РФ НШ-703.2014.2 (2014–2015 гг).

Список литературы

1. Франсон М. Оптика спеклов / пер. с англ. М. : Мир, 1980. 171 с.
2. Goodman J. W. Speckle Phenomena in Optics : Theory and Applications, Roberts & Company, Publishers, Englewood, CO, 2006. 387 p.
3. Джоунс Р., Уайкс К. Голографическая и спекл-интерферометрия / пер. с англ. М. : Мир, 1986. 328 с.
4. Клименко И. С. Голография сфокусированных изображений и спекл-интерферометрия. М. : Наука, 1985. 224 с.
5. Горбатенко Б. Б., Гребенюк А. А., Максимова Л. А., Перепелицына О. А., Рябухо В. П. Спекл-фотография и голографическая интерферометрия с цифровой записью дифракционного поля в фурье-плоскости // Компьютерная оптика. 2010. Т. 34, № 1. С. 69–81.
6. Максимова Л. А., Мысина Н. Ю., Гребенюк А. А., Горбатенко Б. Б., Рябухо В. П. Метод цифровой лазерной спекл-фотографии для измерения микроперемещений рассеивающих объектов // Изв. Саратов. ун-та. Нов. сер. Сер. Физика. 2011. Т. 11, вып. 2. С. 40–45.
7. Горбатенко Б. Б., Рябухо В. П., Гребенюк А. А., Мысина Н. Ю., Максимова Л. А. Контроль микроперемещений методами цифровой голографической и спекл-интерферометрии // Вестн. СГТУ. 2010. № 4(49), вып. 1. С. 14–24.
8. Lu H., Huang C., Wang C., Wang X., Fu H., Chen Z. Fast and noninterpolating method for subpixel displacement analysis of digital speckle images using phase shifts of spatial frequency spectra // Appl. Opt. 2014. Vol. 13. P. 2806–2814.
9. Nguyen T. N., Huntley J. M., Burguete R. L., Coggrave C. R. Shape and displacement measurement of discontinuous surfaces by combining fringe projection and digital image correlation // Opt. Eng. 2011. Vol. 50. P. 101505.
10. Malesa M., Kujawinska M. Modified two-dimensional digital image correlation method with capability of merging of data distributed in time // Appl. Opt. 2012. Vol. 51. P. 8641–8655.
11. Grebenyuk A. A., Ryabukho V. P. Digital image correlation with fast Fourier transform for large displacement measurement // Proceedings of SPIE. 2010. Vol. 7999. P. 79990B-1–79990B-5.
12. Ryabukho V. P., Klimenko I. S., Golubentseva L. I. Interference of laser speckle fields // Proc. SPIE : New Techniques and Analysis in Optical Measurements. 1994. Vol. 2340. P. 513–522.
13. Гудмен Дж. Введение в фурье-оптику / пер. с англ. М. : Мир, 1970. 364 с.

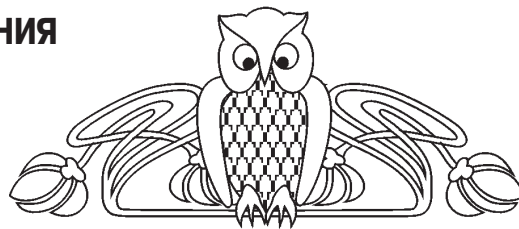


УДК 531.715.1

АВТОДИННАЯ ИНТЕРФЕРОМЕТРИЯ РАССТОЯНИЯ ПРИ МОДУЛЯЦИИ ДЛИНЫ ВОЛНЫ ИЗЛУЧЕНИЯ ПОЛУПРОВОДНИКОВОГО ЛАЗЕРА

Е. И. Астахов, Д. А. Усанов, А. В. Скрипаль, С. Ю. Добдин

Саратовский государственный университет
E-mail: elisey.astakhov@gmail.com



Приведено теоретическое описание метода определения расстояния до объекта при изменении длины волны излучения полупроводникового лазерного автодина. Представлен результат компьютерного моделирования автодинного сигнала и его низкочастотного спектра при гармонической модуляции длины волны излучения лазерного диода. Теоретически обоснован выбор набора спектральных гармоник низкочастотного спектра автодинного сигнала при определении расстояния до объекта. Приведены результаты измерений расстояния до объекта с помощью лазерного диода, работающего в автодинном режиме, при величине девиации частоты излучения, соответствующей 0.00046% длины волны излучения лазерного диода.

Ключевые слова: лазерная интерферометрия, автодин, полупроводниковый лазер, модуляция излучения лазера, измерение расстояния.

Self-mixing Interferometry of Distance at Wavelength Modulation of Semiconductor Laser

E. I. Astakhov, D. A. Usanov, A. V. Skripal, S. Yu. Dobdin

Theoretical description for method of distance measurement at alteration emission wavelength of semiconductor laser, operated in self-mixing regime, has been presented. The result of computer modeling of self-mixing signal at harmonic wavelength modulation of laser diode has been represented. Spectral harmonic selection of low-frequency spectrum of self-mixing signal for distance measurement has been theoretically substantiated. The results of distance measurements using self-mixing laser interferometer, at deviation of emission frequency, corresponding 0.00046% of laser diode wavelength has been demonstrated.

Key words: laser interferometry, self-mixing interferometry, semiconductor laser, wavelength modulation, distance measurement.

DOI: 10.18500/1817-3020-2015-15-3-12-18

Введение

В настоящее время для определения расстояния до объекта с помощью оптического зондирования представляются перспективными методы оптической интерферометрии с изменением длины волны, основанные на регистрации фазы отраженного лазерного излучения [1]. Применение полупроводниковых лазеров в качестве перестраиваемых источников когерентного излучения открывает возможности создания малогабаритных измерительных систем [2]. К ним

относятся системы с использованием лазеров с внешней оптической обратной связью, работающие в режиме автодинного детектирования в полупроводниковом лазере [3].

В работах [4–6] продемонстрирована возможность успешного применения полупроводникового лазера с токовой модуляцией для измерения расстояний, параметров движения, вибраций объектов. В этих работах используется эффект изменения длины волны излучения лазерного диода при изменении инжекционного тока лазера по линейному закону. Излучение полупроводникового лазера фокусируется на исследуемый объект, а отраженное им излучение поступает на лазерный диод, где оно за счет высокого коэффициента усиления активной среды диода существенно увеличивает свою мощность и интерферирует с исходным излучением, направленным на катод встроенного в лазер контрольного фотодиода. При работе такого интерферометра отраженный объектом свет приходит в лазер с некоторой задержкой по времени, обусловленной конечным значением скорости света. В результате даже при неподвижном объекте интерференция исходного и отраженного излучений приводит к тому, что выходной ток фотодиода периодически изменяется с частотой, определяемой модуляционной характеристикой лазерного диода и расстоянием до объекта. Основным недостатком такой схемы измерений, как отмечают авторы работы [4], является пилообразная помеха, обусловленная периодическим скачкообразным изменением мощности лазера.

Важным параметром при проведении измерений с использованием лазерной автодинной системы является уровень внешней оптической обратной связи. В автодинной системе режим, при котором автодинный сигнал аналогичен интерференционному с развязкой от источника излучения, возможен при низких уровнях обратной связи. При увеличении уровня обратной связи происходит искажение автодинного сигнала в



отличие от случая, когда интерференция происходит в системе, отделенной от источника сигнала развязывающим элементом. Как было показано в работах [7–10], уровень внешней оптической обратной связи оказывает существенное влияние на форму автодинного сигнала полупроводникового лазерного излучателя и, как результат, на точность определения параметров движения отражателя в автодинных системах. Авторами работы [10] токовая модуляция полупроводникового лазерного автодина использовалась для учета влияния уровня внешней оптической обратной связи на измеряемое значение амплитуды нановибраций, при этом использовалась предварительная калибровка автодинного сигнала, реализуемая возбуждением дополнительных механических колебаний отражателя.

Ранее нами был предложен метод определения расстояния до объекта по отношению второй и четвертой спектральных составляющих автодинного сигнала полупроводникового лазера с гармонической модуляцией длины волны излучения посредством частотной модуляции тока накачки лазерного диода [11]. При использовании широкого диапазона девиации частоты излучения лазерного диода в низкочастотном спектре автодинного сигнала полупроводникового лазера наблюдаются спектральные составляющие высоких порядков. В этом случае использование отношения второй и четвертой спектральных составляющих автодинного сигнала, ограничивается областью неоднозначности функций Бесселя, используемых в соотношениях для определения расстояния до объекта.

Целью настоящей работы явилось теоретическое и экспериментальное обоснование возможности измерения расстояния до объекта по наборам спектральных гармоник автодинного сигнала частотномодулированного полупроводникового лазерного автодина более высоких порядков.

Формирование низкочастотного спектра автодинного сигнала при гармонической модуляции длины волны излучения лазерного диода

Полупроводниковый лазер с внешней оптической обратной связью можно описать в рамках модели составного резонатора Лэнга и Кобаяши [12]. Динамику одномодового лазерного излучения в такой модели можно описать уравнениями для комплексного электрического поля с запаздывающим аргументом и концентрации

носителей заряда [13, 14]. В работе [8] показана возможность представления автодинного сигнала в режиме стационарной генерации излучения полупроводникового лазера, позволившая перейти от системы дифференциальных уравнений на основе использования малосигнального анализа к нелинейному уравнению для мощности излучения полупроводникового лазерного автодина.

При воздействии отраженного излучения от объекта на лазерный диод излучаемая им мощность может быть определена в результате использования малосигнального анализа дифференциальных уравнений для комплексного электрического поля с запаздывающим аргументом и для концентрации носителей заряда и записана в виде [8]:

$$P(j(t)) = P_1(j(t)) + P_2(j(t)) \cos(\omega(j(t))\tau_0), \quad (1)$$

где $P_1(j(t))$ – составляющая мощности, независимая от расстояния до внешнего отражателя, $P_2(j(t))$ – амплитудная составляющая мощности, зависящая от фазового набег волн $\omega(j(t))\tau_0$ в системе с внешним отражателем, τ_0 – время обхода лазерным излучением расстояния до внешнего отражателя, $\omega(j(t))$ – частота излучения полупроводникового лазера, зависящая от плотности тока накачки $j(t)$ и уровня обратной связи.

При модуляции длины волны излучения полупроводникового лазера частота и амплитудные составляющие мощности излучения лазера определяются соотношениями:

$$\omega(j(t)) = \omega_0 + \omega_A \cdot \sin(2\pi\nu_1 t + \varepsilon_1),$$

$$P_1(j(t)) = I_1 \sin(2 \cdot \pi \cdot \nu_1 \cdot t + \varepsilon_1),$$

$$P_2(j(t)) = I_2 \sin(2 \pi \nu_1 t + \varepsilon_1),$$

где ω_0 – собственная частота излучения полупроводникового лазерного диода; ω_A – девиация частоты излучения полупроводникового лазерного диода; ν_1 – частота модуляции тока питания лазерного диода; ε_1 – начальная фаза. I_1 и I_2 – амплитуды токовой модуляции составляющих $P_1(j(t))$ и $P_2(j(t))$.

Таким образом, выражение для мощности излучения частотномодулированного полупроводникового лазера (1) запишется в виде:

$$P(j(t)) = I_1 \sin(2\pi\nu_1 t + \varepsilon) + I_2 \sin(2\pi\nu_1 t + \varepsilon) \cos(\omega_0 \tau_0 + \omega_A \tau_0 \sin(2\pi\nu_1 t + \varepsilon)),$$

где $\theta = \omega_0 \tau_0$, $\sigma = \omega_A \tau_0$.

Для описания низкочастотного спектра автодинного сигнала при гармонической модуляции длины волны излучения лазерного диода мощность автодинного сигнала может быть пред-



ставлена в виде разложения в ряд по функциям Бесселя первого рода J_n и в ряд Фурье с коэффициентами разложения a_n и b_n аналогично тому, как это сделано в работе [15].

Вводя коэффициенты C_n , равные по модулю четным и нечетным спектральным составляющим разложения ряда Фурье и определяемые как

$$C_{2n} = \sqrt{a_{2n}^2 + b_{2n}^2}, \quad C_{2n+1} = \sqrt{a_{2n+1}^2 + b_{2n+1}^2},$$

можно получить их значения в виде

$$C_1 = \cos(\theta)I_2(J_0(\sigma) - J_2(\sigma)) + I_1, \quad (2)$$

для четных n :

$$C_{2n} = \sin(\theta)I_2(J_{2n-1}(\sigma) - J_{2n+1}(\sigma)), \quad (3)$$

для нечетных n :

$$C_{2n+1} = \cos(\theta)I_2(J_{2n}(\sigma) - J_{2n+2}(\sigma)), \quad (4)$$

Соотношения (2)–(4) характеризуют связь спектральных составляющих частотномодулированного автодинного сигнала с функциями Бесселя первого рода.

Для определения расстояния до объекта L , входящего в параметр σ используем отношение $2n$ и $2n+2$ спектральных гармоник и отношение $2n+1$ и $2n+3$ спектральных гармоник:

$$C_{2n} / C_{2n+2} = (J_{2n-1}(\sigma) - J_{2n+1}(\sigma)) / (J_{2n+1}(\sigma) - J_{2n+3}(\sigma)). \quad (5)$$

$$C_{2n+1} / C_{2n+3} = (J_{2n}(\sigma) - J_{2n+2}(\sigma)) / (J_{2n+2}(\sigma) - J_{2n+4}(\sigma)). \quad (6)$$

Решение полученных уравнений (5) и (6) относительно неизвестного параметра $\sigma = \omega_A \tau_0$ требует знания параметров токовой модуляции лазерного автодина, в частности девиации частоты излучения лазерного диода ω_A . Принимая во внимание, что $\tau_0 = 2 \cdot L / c$, получаем соотношение для определения расстояния до объекта:

$$L = \frac{c}{2} \cdot \frac{\sigma}{\omega_A}.$$

Компьютерное моделирование автодинного сигнала и его низкочастотного спектра при гармонической модуляции длины волны излучения лазерного диода

Компьютерное моделирование автодинного сигнала и спектра частотномодулированного полупроводникового лазера проводилось при следующих параметрах: длина волны излучения лазера $\lambda = 654$ нм, частота модуляции тока питания лазерного диода $\nu_1 = 100$ Гц, расстояние до объекта $L = 0.1$ м. Отношение параметров I_1 и I_2 определялось по форме автодинных сигналов, полученных экспериментально.

На рис. 1–3 представлены частотномодулированные автодинные сигналы и их спектры, смоделированные при различных значениях девиации частоты излучения полупроводникового лазерного диода ω_A , связанных с интервалом изменения модулирующего тока питания лазера.

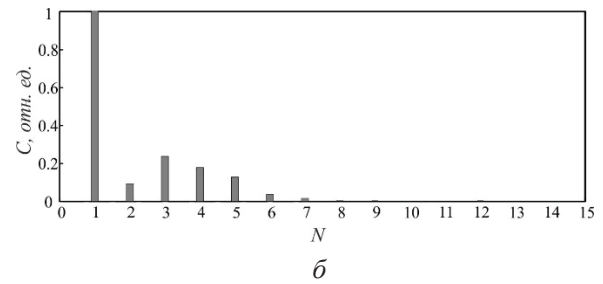
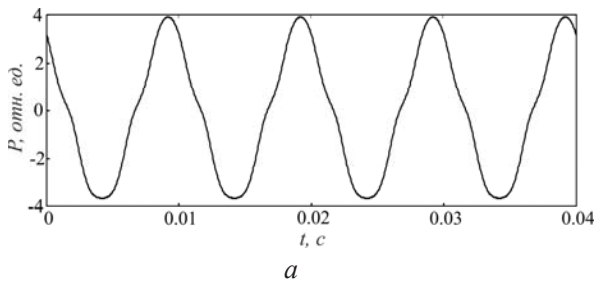


Рис. 1. Смоделированный частотномодулированный автодинный сигнал (а) и его спектр (б) при девиации частоты излучения лазерного диода $\omega_A = 50 \cdot 10^8$ рад/с, $\sigma = 3,33$

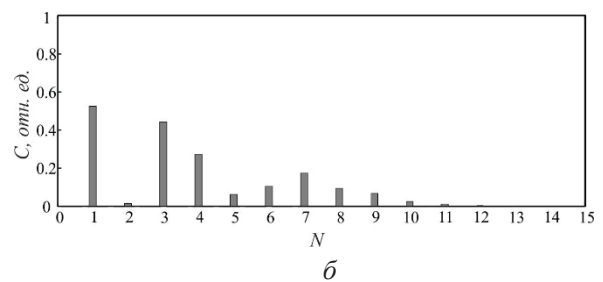
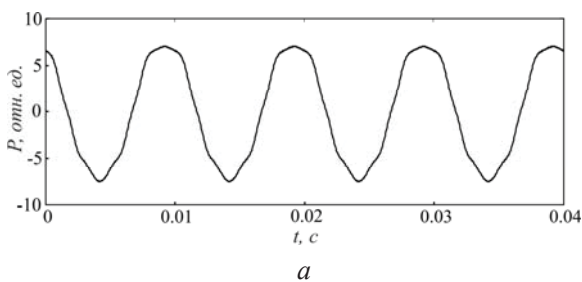


Рис. 2. Смоделированный частотномодулированный автодинный сигнал (а) и его спектр (б) при девиации частоты излучения лазерного диода $\omega_A = 100 \cdot 10^8$ рад/с, $\sigma = 6,67$

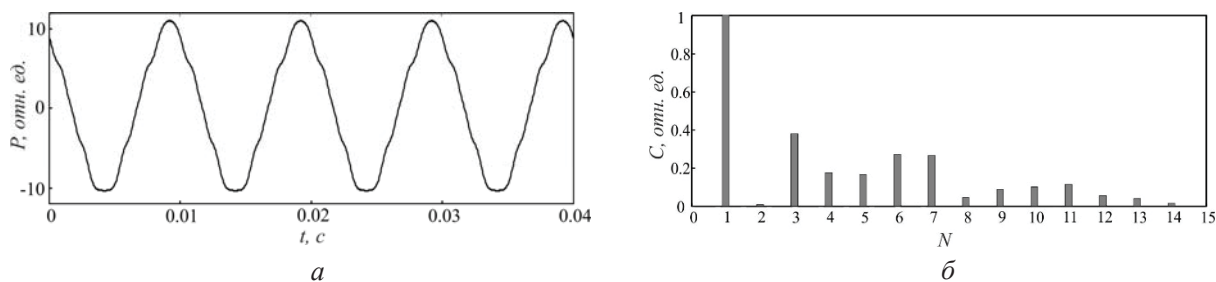


Рис. 3. Смоделированный частотномодулированный автодинный сигнал (а) и его спектр (б) при девиации частоты излучения лазерного диода $\omega_A = 150 \cdot 10^8$ рад/с, $\sigma = 10$

Как видно из рис. 1–3, с увеличением ω_A происходит как изменение формы автодинного сигнала, так и его спектра, при этом наблюдается увеличение числа гармоник низкочастотного спектра автодинного сигнала.

По спектрам автодинного сигнала (см. рис. 1–3 (б)), при увеличении девиации частоты излучения лазерного диода ω_A , используя уравнения (5) и (6), были рассчитаны значения параметра σ по наборам четных и нечетных спектральных гармоник. При этом было установлено, что вычисленное из спектров автодинного сигнала значение параметра σ совпадало с заданным при компьютерном моделировании автодинного сигнала при частоте девиации лазерного диода $\omega_A = 50 \cdot 10^8$ рад/с для номеров $n \geq 3$, при

$\omega_A = 100 \cdot 10^8$ рад/с для $n \geq 6$, при $\omega_A = 150 \cdot 10^8$ для $n \geq 9$.

Для определения номеров спектральных гармоник, используемых для корректного решения обратной задачи, были проведены расчеты функций Бесселя, входящих в уравнения (5) и (6). На рис. 4 приведены зависимости функций Бесселя различных порядков от аргумента функции.

Как видно из приведенных зависимостей, область однозначности функций Бесселя возрастает с увеличением используемого в расчетах порядка n .

На рис. 5 приведены зависимости функции отношения двух спектральных гармоник автодинного сигнала, имеющих вид уравнений (5), (6).

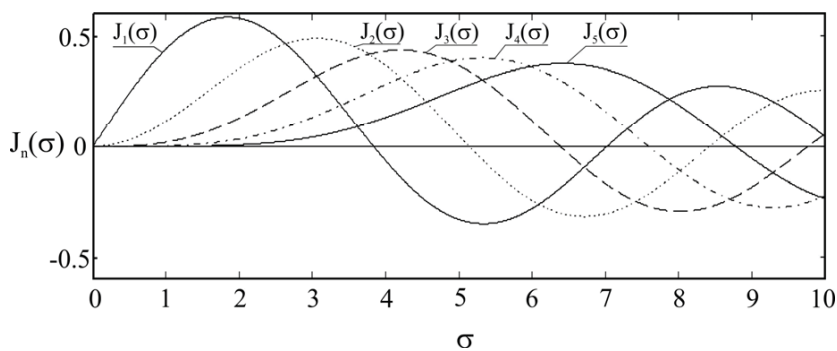


Рис. 4. Зависимость функций Бесселя 1–5 порядка от аргумента функции

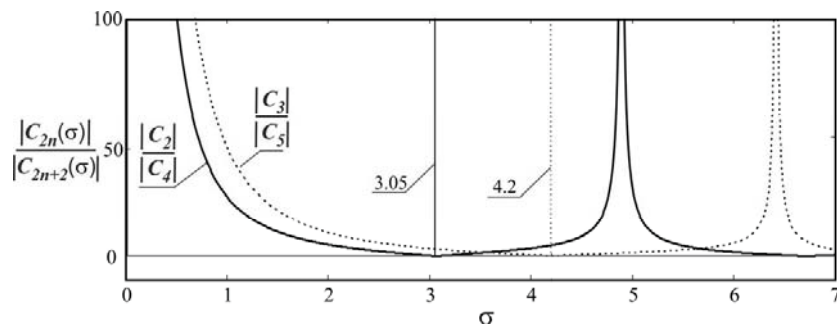


Рис. 5. Зависимость функции отношения двух спектральных гармоник автодинного сигнала



Как видно из рис. 5, существует область однозначности функций отношения двух спектральных гармоник автодинного сигнала, определяемая пересечением функции с осью абсцисс.

В таблице приведены области однозначности функций отношения двух спектральных гармоник автодинного сигнала для различных наборов спектральных гармоник, определяемых в уравнениях (5) и (6) номером n .

Значения аргумента функций отношения двух спектральных гармоник автодинного сигнала, соответствующих области однозначности

n	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$\sigma <$	3.05	4.2	5.3	6.4	7.5	8.6	9.6	10.7	11.8	12.8

Другими словами, для значений σ меньших, приведенных в таблице, для соответствующего номера n , решение уравнений (5) и (6) имеет только одно абсолютное значение. Таким обра-

зом, при определении этого параметра следует в спектре автодинного сигнала выбирать такие номера n , чтобы σ было меньше значения, приведенного в таблице, для соответствующего номера n .

Существование области неоднозначных решений уравнений (5) и (6) в значительной степени связано с трудностями практического определения знаков спектральных составляющих C_n [16]. Несмотря на то что моделирование по определению знаков спектральных составляющих C_n ранее нами было проведено [8], на практике определять их знак затруднительно, в частности, в связи с тем, что измерительные приборы регистрируют абсолютные величины сигналов.

Измерения расстояний до объекта с помощью частотномодулированного лазерного автодина

Измерения проводились на установке, изображение которой представлено на рис. 6.

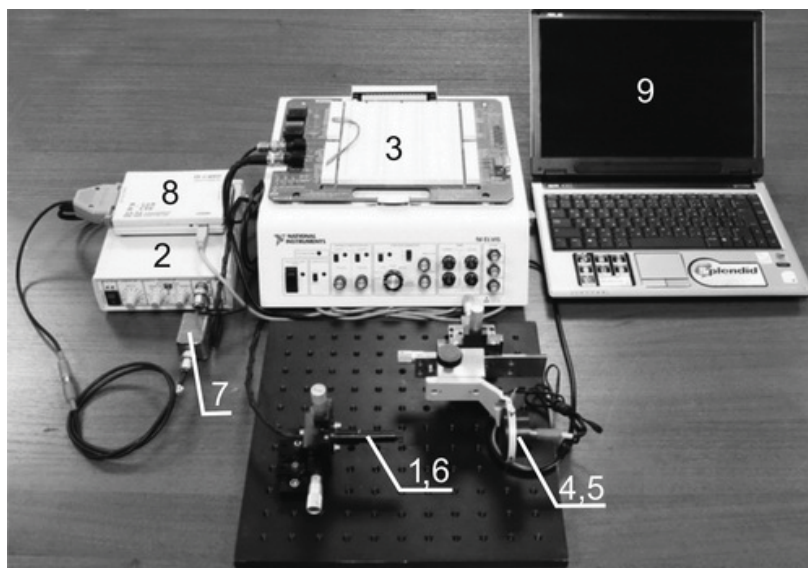


Рис. 6. Вид экспериментальной установки: 1 – полупроводниковый лазер, 2 – блок управления током питания, 3 – генератор сигналов на базе платформы NI ELVIS, 4 – объект, 5 – микромеханическая подача, 6 – фотоприемник, 7 – фильтр переменного сигнала, 8 – АЦП, 9 – компьютер

В состав установки входили частотномодулированный полупроводниковый лазерный автодин на лазерном диоде RLD-650(5) на квантоворазмерных структурах с дифракционно-ограниченной одиночной пространственной модой с длиной волны 654 нм – 1, излучение которого направлялось на объект – 4, закрепленный на микромеханической подаче – 5, при этом диаметр пятна лазерного излучения на поверхности объекта со-

ставлял 1 мм. Модуляция длины волны излучения проводилась на частоте $\nu_1 = 300$ Гц посредством модуляции тока питания лазера с помощью встроенного в учебную лабораторную станцию виртуальных приборов NI ELVIS генератора сигналов – 3. Изменение тока питания лазерного диода осуществлялось путем изменения напряжения питания, подаваемого на полупроводниковую структуру от блока управления током питания – 2.



Нами было экспериментально установлено, что эффективная модуляция тока питания лазерного диода наблюдалась при амплитуде модулирующего сигнала от 20 мВ до 500 мВ, что обеспечивало наличие в спектре автодинного сигнала спектральных составляющих высших порядков. Отметим, что лазерный диод запитывался от источника тока. Отраженное излучение направлялось в резонатор лазера, изменение мощности которого фиксировалось фотоприемником – 6. Продетектированный и усиленный сигнал с фотоприемника проходил через фильтр

переменного сигнала – 7 и поступал на вход аналого-цифрового преобразователя – 8 (с частотой дискретизации 100 кГц), соединенного с компьютером – 9. Параметр девиации частоты излучения лазерного диода ω_d измерялся с помощью спектрометра высокого разрешения SHR (Solar Laser Systems).

На рис. 7 приведен вид автодинного сигнала и его спектр, полученный при $\omega_d = 132 \cdot 10^8$ рад./с, что соответствует величине девиации частоты излучения, равной 0.00046% длины волны излучения лазерного диода.

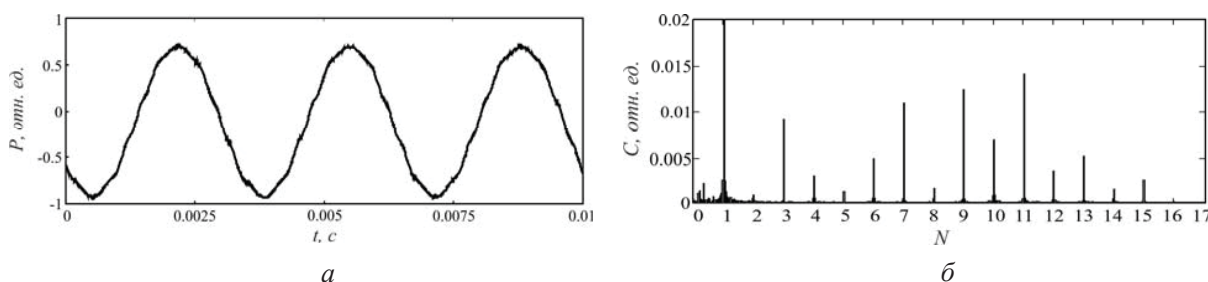


Рис. 7. Частотномодулированный автодинный сигнал (а) и его спектр (б), полученный на экспериментальной установке при девиации частоты излучения лазерного диода $\omega_d = 132 \cdot 10^8$ рад./с

Результаты вычислений параметра σ для различных наборов отношений n и $n + 2$ спектральных гармоник свидетельствуют, что для номеров n , равных 9 и 10 существует интервал с минимальным разбросом определяемого параметра σ . Проверка достоверности вычисленного параметра σ , показывает, что именно начиная с номера n , равного 9, параметр σ становится меньше приведенного в таблице 2, при котором решение уравнений (5) и (6) имеют однозначное решение.

Довольно узкая область решений уравнений (5) и (6), имеющих однозначное решение, объясняется сильной немонотонностью функций Бесселя особенно при малых значениях аргумента σ . С ростом σ область монотонности расширяется, однако уменьшается амплитуда функции.

Исходя из области однозначных решений уравнений (5) и (6), по отношению спектральных составляющих с 9 по 12 вычисленное значение параметра σ составило 9.88 ± 0.03 , для расстояния до объекта, равного 11.23 ± 0.03 см.

Авторами работы [6] достигнута точность измерений расстояния в 300 мкм на расстоянии, равном 20 см. В работе [2] авторы заявляют достигнутую точность измерений в 500 мкм при расстоянии до объекта, равном 60 см. Наилучшая точность измерений достигнута в работе [1] при использовании непрерывно перестраиваемого

лазерного диода FMCW, которая составляла 43 мкм на расстоянии в 1 метр.

Заключение

Как следует из результатов измерений абсолютных расстояний описанным выше методом, полученная нами точность измерений соответствует указанному в [1, 2, 6] достижениям. В то же время нами использовались недорогие лазерные диоды типа RLD-650 и сравнительно простая установка для измерений.

Таким образом, показано, что гармоническая модуляция длины волны излучения посредством частотной модуляции тока накачки лазерного диода позволяет по отношению к спектральным составляющим автодинного сигнала полупроводникового лазера с высокой точностью определять расстояния до объекта.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования и науки РФ (государственное задание №1376 и 1575).

Список литературы

1. Amann M. C., Bosch T., Lescure M., Myllyla R., Rioux M. Laser ranging : a critical review of usual technique for distance measurement // Opt. Eng. 2001. Vol. 40, № 1. P. 10–19.



2. Giuliani G., Norgia M., Donati S., Bosch T. Laser diode self-mixing technique for sensing applications // J. Opt. A : Pure Appl. Opt. 2002. Vol. 4, № 6. P. 283–S294.
3. Усанов Д. А., Скрипаль А. В. Измерение микро- и нановибраций и перемещений с использованием полупроводниковых лазерных автодинов // Квант. электроника. 2011. Т. 41, № 1. С. 86–94.
4. Соболев В. С., Кащеева Г. А. Активная лазерная интерферометрия с частотной модуляцией // Автометрия. 2008. Т. 44, № 6. С. 49–65.
5. Norgia M., Giuliani G., Donati S. Absolute Distance Measurement With Improved Accuracy Using Laser Diode Self-Mixing Interferometry in a Closed Loop // IEEE transaction on instrumentation and measurement. 2007. Vol. 56, № 5. P. 1894–1900.
6. Guo D., Wang M. Self-mixing interferometry based on a double modulation technique for absolute distance measurement // Appl. Opt. 2007. Vol. 46, № 9. P. 1486–1491.
7. Unlocking dynamical diversity : Optical feedback effects on semiconductor lasers / eds. D. M. Kane, K. Alan Shore. John Wiley & Sons Ltd, The Atrium, 2005. 333 p.
8. Усанов Д. А., Скрипаль А. В. Полупроводниковые лазерные автодины для измерения параметров движения при микро- и наносмещениях. Саратов : Изд-во Саратов. ун-та, 2014. 136 с.
9. Усанов Д. А., Скрипаль А. В., Авдеев К. С. Изменение спектра сигнала лазерного полупроводникового автодина при фокусировке излучения // Изв. вузов. ПНД. 2009. Т. 17, № 2. С. 54–65.
10. Усанов Д. А., Скрипаль А. В., Кацавцев Е. О., Калинин М. Ю. Измерение амплитуды нановибраций с помощью полупроводникового лазерного автодина с учетом влияния обратной связи // Письма в ЖТФ. 2012. Т. 38, № 12. С. 81–86.
11. Усанов Д. А., Скрипаль А. В., Авдеев К. С. Определение расстояния до объекта с помощью частотномодулированного полупроводникового лазерного автодина // Письма в ЖТФ. 2007. Т. 33, вып. 21. С. 72–77.
12. Lang R., Kobayashi K. External optical feedback effects on semiconductor injection laser properties // IEEE J. Quantum Electron. 1980. Vol. QE-16, № 3. P. 347–355.
13. Olesen H., Osmundsen J. H., Tromborg B. Nonlinear dynamics and spectral behavior for an external cavity laser // IEEE J. Quantum Electron. 1986. Vol. QE-22, № 6. P. 762–773.
14. Schunk N., Petermann K. Numerical analysis of the feedback regimes for a single-mode semiconductor lasers with external feedback // IEEE J. Quantum Electron. 1988. Vol. 24, № 7. P. 1242–1247.
15. Усанов Д. А., Скрипаль А. В., Авдеев К. С. Применение полупроводникового лазерного автодина с модуляцией длины волны излучения для определения расстояния до объекта // Нано- и микросистемная техника. 2009. № 2. С. 43–47.
16. Вагарин В. А., Скрипаль А. В., Усанов Д. А. Об ограничениях в применении спектрального метода определения амплитуды вибраций // Автометрия. 1994. № 1. С. 89–90.

УДК 535.361; 53.06

ОПТИЧЕСКОЕ ПРОСВЕТЛЕНИЕ СКЛЕРЫ ГЛАЗА ЧЕЛОВЕКА ВОДНЫМ 30%-НЫМ РАСТВОРОМ ГЛЮКОЗЫ

А. Н. Башкатов^{1,2}, Э. А. Генина^{1,2}, В. И. Кочубей¹, Т. Г. Каменских³, В. В. Тучин^{1,2,4}

¹Саратовский государственный университет

²Томский государственный университет

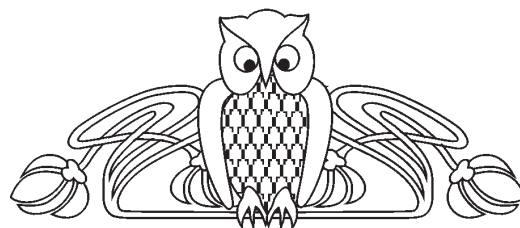
³Саратовский государственный медицинский университет

⁴Институт проблем точной механики и управления РАН, Саратов

E-mail: a.n.bashkatov@mail.ru

В работе исследовано оптическое просветление склеры глаза человека *in vitro* под действием водного 30% раствора глюкозы. Показано, что диффузия глюкозы приводит к существенному снижению светорассеяния, что проявляется в снижении отражения и увеличении пропускания образцов биоткани. Коэффициент поглощения при этом не изменяется. Измерения были выполнены на спектрофотометре CARY-2415 в диапазоне длин волн от 400 до 800 нм по стандартной методике. Для обработки данных спектральных измерений и восстановления оптических характеристик использовался инверсный метод «добавления – удвоения». Полученные результаты могут быть использованы при разработке новых и оптимизации существующих методов оптической диагностики и терапии глазных заболеваний.

Ключевые слова: склера глаза человека, глюкоза, управление



оптическими параметрами биотканей, спектроскопия с использованием интегрирующих сфер.

Optical Clearing of Human Eye Sclera by Aqueous 30%-Glucose Solution

A. N. Bashkatov, E. A. Genina, V. I. Kochubey, T. G. Kamenskikh, V. V. Tuchin

In this work, optical clearing of human eye sclera *in vitro* under action of aqueous 30% glucose solution was studied. It was shown that diffusion of glucose in tissue results in significant decrease of light scattering, which manifests itself in both decreasing reflectance and increasing transmittance of the samples. At that, absorption coefficient does not change. Measurements were performed with



spectrophotometer CARY-2415 in the spectral range from 400 to 800 nm by a standard method. Inverse Adding-Doubling Method was used for processing of data of the spectral measurements and reconstruction of optical parameters. Obtained results can be used in the development of new methods and optimization of existing ones in optical diagnostics and therapy of eye diseases.

Key words: human eye sclera, glucose, optical clearing, integrating sphere spectroscopy.

DOI: 10.18500/1817-3020-2015-15-3-18-24

Введение

Возможность управления оптическими характеристиками биотканей важна для многих направлений лазерной медицины. Например, уменьшение светорассеяния в склере глаза позволит значительно понизить мощность излучения, применяемого при транссклеральном освещении глаза при диафаноскопии или трансиллюминации [1–3], транссклеральной коагуляции сетчатки и цилиарного тела глаза при лечении глаукомы [4–8], уменьшить транссклеральное воздействие лазерной энергии при лечении миопии и других заболеваний [9]. В последнее время в дополнение к известным методам диагностики, которые используют транссклеральное освещение, появляются новые методы, сочетающие в себе транссклеральное освещение и офтальмоскопию, в частности безрефлексная широкопольная офтальмоскопия [10]. Таким образом, совершенно очевидно, что расширение возможностей транссклеральных методов диагностики и лечения глазных заболеваний – одна из актуальных задач современной офтальмологии.

Одной из проблем, возникающих при решении данной задачи, является снижение светорассеяния в склере глаза. Одним из возможных решений данной проблемы является применение так называемой техники «оптического просветления» [11–14], при которой внутритканевая жидкость биоткани замещается биосовместимым гипертоническим иммерсионным агентом с показателем преломления большим, чем показатель преломления внутритканевой жидкости. Поскольку процесс «оптического просветления» является обратимым, то данная методика может использоваться в клинической практике для временного снижения светорассеяния склеры глаза [15–18]. Помимо вышеприведенных работ влияние гипертонических агентов на оптические характеристики склеры ранее было исследовано в работах [19–29], из которых следует, что водные растворы глюкозы могут быть использованы в качестве «оптических просветляющих агентов» (ОПА).

Целью настоящей работы является исследование возможности снижения светорассеяния в склере глаза человека при воздействии на нее водным 30%-ным раствором глюкозы.

Материалы и методы

В качестве объекта исследования было использовано 10 образцов склеры глаза человека. Образцы склеры были получены методом аутопсии не позднее 24 часов после смерти. С момента аутопсии и до проведения измерений образцы склеры глаза хранились в физиологическом растворе. Непосредственно перед проведением экспериментов у образцов биоткани размером 1×1 см с помощью стандартного микрометра измерялась толщина, которая в среднем составила 0.5 ± 0.1 мм. Все эксперименты были выполнены при комнатной температуре, порядка 20°C .

Измерение спектров диффузного отражения (R_d) и полного (T_t) и коллимированного (T_c) пропускания было выполнено на спектрофотометре CARY-2415 в диапазоне длин волн от 400 до 800 нм по стандартной методике. Образцы склеры фиксировались на специальном пластмассовом держателе и помещались в кювету с иммерсионной жидкостью. Спектры отражения и пропускания последовательно регистрировались в течение 15 мин. Скорость сканирования 5 нм/с.

Расчет спектральной зависимости коэффициента поглощения (μ_a) и транспортного коэффициента рассеяния ($\mu'_s = \mu_a + \mu_s(1-g)$) был выполнен с использованием инверсного метода «добавления – удвоения» (ИДУ) [30]. Здесь μ_s – коэффициент рассеяния и g – фактор анизотропии рассеяния. Расчет коэффициента ослабления ($\mu_t = \mu_a + \mu_s$) производился на основе закона Бугера – Ламберта: $T_c \approx \exp(-\mu_t l)$, где l – толщина образца биоткани. Таким образом, знание трех измеряемых параметров R_d , T_t и T_c позволяет восстановить все оптические характеристики биоткани: μ_a , μ'_s , μ_s и g .

В качестве иммерсионной жидкости использовался водный раствор глюкозы с концентрацией 0.3 г/мл. Раствор был приготовлен с использованием порошкообразного моногидрата глюкозы («ХимМед», Россия). Показатель преломления раствора – 1.378. Измерение было выполнено на рефрактометре Аббе на длине волны 589 нм.

Результаты и их обсуждение

На рис. 1, *a–e* представлены типичные спектры и кинетика изменения диффузного отражения и полного и коллимированного пропускания образцов склеры глаза человека под действием водного 30%-ным раствора глюкозы. Из рис. 1 видно значительное (примерно на 15% в красной области спектра) снижение диффузного отражения и рост (примерно на 25% для полного и примерно в 3 раза для коллимированного) пропускания образца склеры под действием раствора



глюкозы. Снижение отражения и рост пропускания наблюдаются в течение примерно первых 8 мин, после чего процесс диффузии прекращается, и изменений отражения и пропускания не происходит. Наблюдаемое изменение отражения и пропускания биоткани связано с диффузией глюкозы в биоткань, частичным замещением внутритканевой жидкости, ростом ее показателя преломления и, как следствие, снижением све-

торассеяния. Полученные результаты хорошо коррелируют с данными работы [20], в которой измерялся коэффициент диффузии глюкозы в склере глаза и было показано, что диффузия глюкозы в склеру происходит в течение 8–9 мин, после чего иммерсирование биоткани прекращается, т.е. наступает максимально возможное для данной концентрации иммерсионного агента – «оптическое просветление».

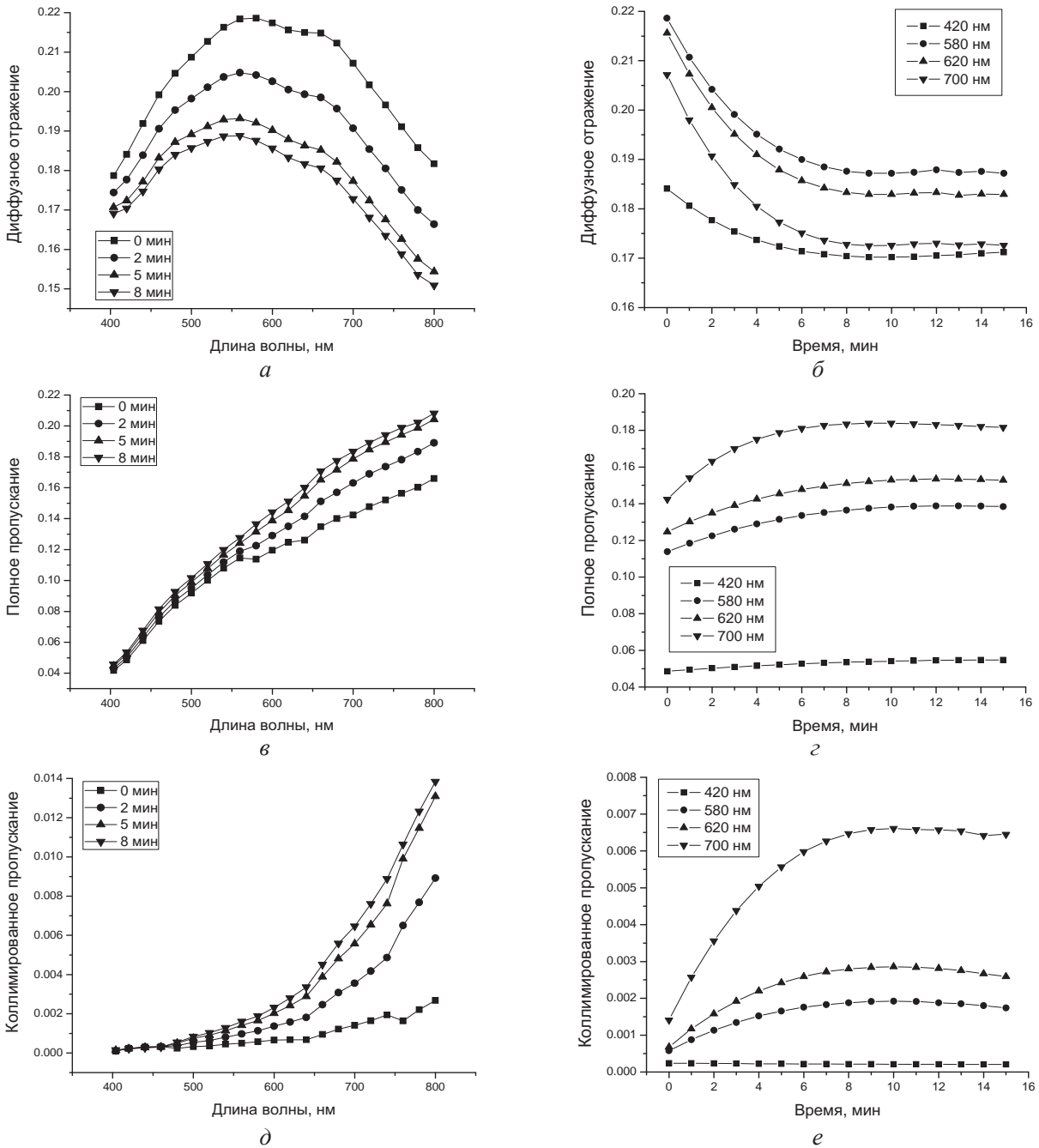


Рис. 1. Типичные спектры диффузного отражения (а), полного (б) и коллимированного пропускания (д) склеры глаза, измеренные в различные моменты времени, и кинетика изменения диффузного отражения (б), полного (z) и коллимированного пропускания (e) склеры глаза, измеренная на нескольких длинах волн, при воздействии на образец водным 30%-ным раствором глюкозы. Символы соответствуют экспериментальным данным



На рис. 2 приведены спектры поглощения, рассчитанные методом ИДУ, для различных интервалов времени воздействия на образец склеры водным раствором глюкозы. Из рисунка

видно, что коэффициент поглощения в процессе просветления не изменяется, что связано с тем, что глюкоза не имеет явно выраженных полос поглощения в видимой области спектра.

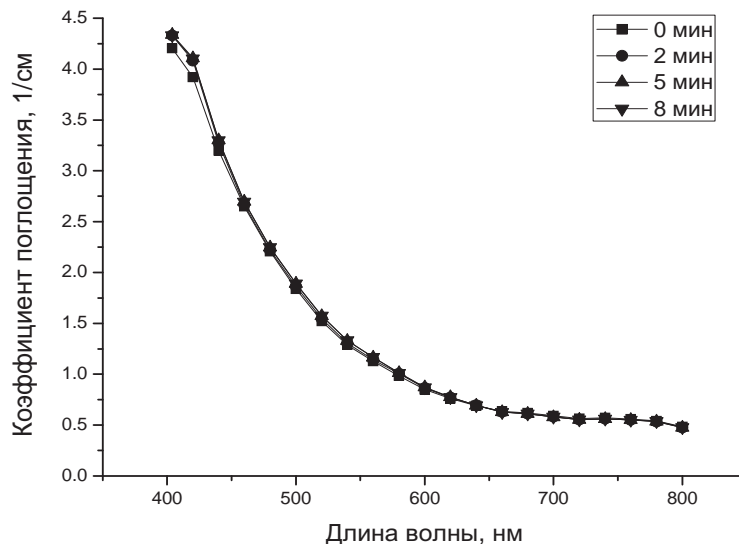


Рис. 2. Спектры коэффициента поглощения склеры глаза, измеренные в различные моменты времени, при воздействии на образец водным 30%-ным раствором глюкозы. Символы соответствуют экспериментальным данным

На рис. 3, а–е приведена спектральная зависимость рассеивающих характеристик склеры глаза, измеренная в различные моменты времени, и кинетика их изменения, измеренная на нескольких длинах волн. Хорошо видно, что по мере проникновения глюкозы в биоткань наблюдается уменьшение (примерно на 20–22% в красной области спектра) как коэффициента рассеяния, так и транспортного коэффициента рассеяния склеры, о чем наглядно свидетельствует кинетика их изменения, представленная на рис. 3, б, г). В то же время из рис. 3, е виден незначительный рост фактора анизотропии рассеяния, что хорошо согласуется с оценками, выполненными ранее в работе [31], в которой на основании скалярной теории дифракции было показано, что при замещении внутритканевой жидкости склеры глаза водным раствором глюкозы должен наблюдаться рост фактора анизотропии рассеяния, причем максимальная степень «просветления» должна наблюдаться в течение 8–10 мин.

Таким образом, воздействие водного 30%-ного раствора глюкозы на склеру глаза человека сводится к частичному замещению внутрисклеральной жидкости раствором глюкозы. При этом происходит уменьшение относительного

показателя преломления рассеивателей склеры и, как следствие, иммерсионное просветление биоткани.

Степень оптического просветления является одним из важнейших параметров, характеризующих сравнительную эффективность и практическую ценность различных просветляющих агентов. Степень (эффективность) оптического просветления склеры оценивалась в трех спектральных диапазонах с помощью выражения [32]:

$$OC_{eff} = \frac{\mu_{s0} - \mu_s(\text{time})}{\mu_{s0}},$$

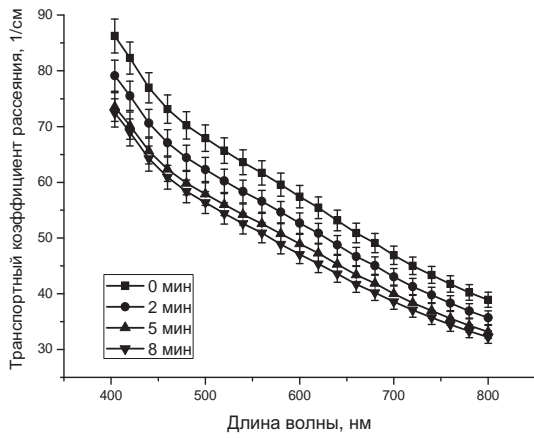
где μ_{s0} – коэффициент рассеяния в начальный момент времени, $\mu_s(\text{time})$ – значение коэффициента рассеяния в момент времени time оптического просветления биоткани. Полученные результаты представлены на рис. 4.

Из рисунка хорошо видно, что эффективность оптического просветления растет как со временем воздействия раствора глюкозы на склеру глаза, так и с увеличением длины волны, увеличиваясь, например, с 0.053 ± 0.005 (в области 420 нм) до 0.233 ± 0.012 (в области 700 нм) через 5 мин после начала воздействия или с 0.173 ± 0.009 (в области 580 нм) до 0.247 ± 0.012 (в области 700 нм) через 10 мин после начала

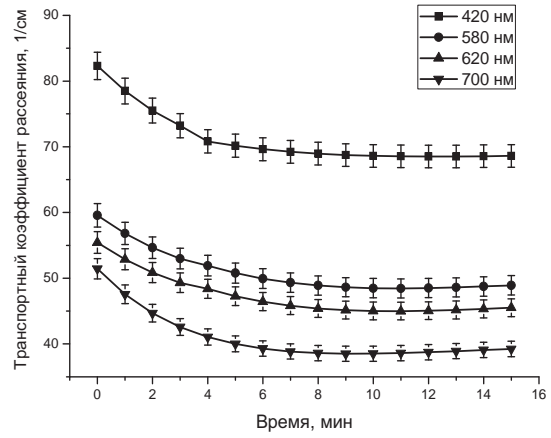


воздействия. Данное поведение объясняется тем, что с ростом длины волны уменьшается различие между значениями показателя преломления

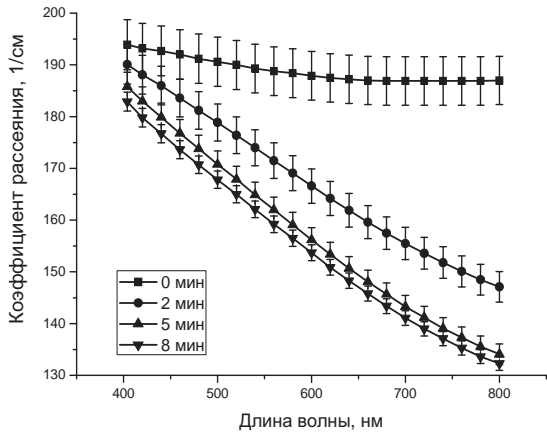
коллагеновых волокон – основных рассеивателей склеры – и значениями показателя преломления внутриканальной жидкости.



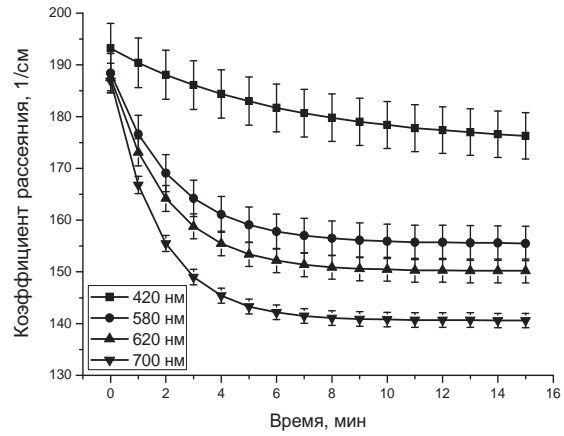
а



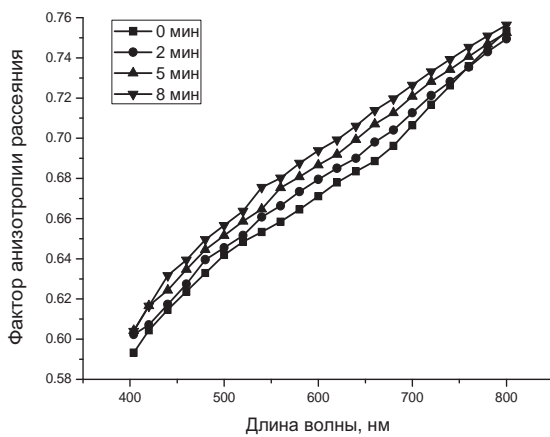
б



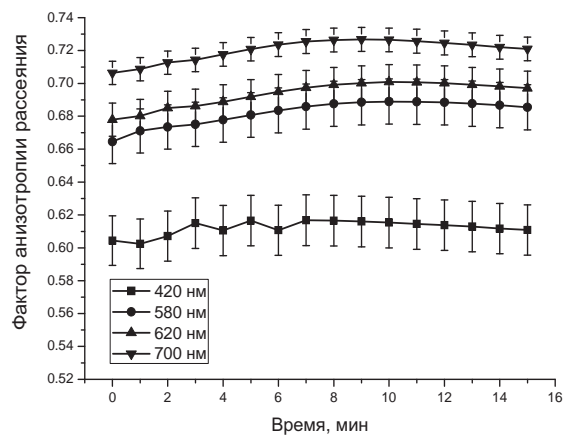
в



г



д



е

Рис. 3. Спектры транспортного коэффициента рассеяния (а), коэффициента рассеяния (в) и фактора анизотропии рассеяния (д) склеры глаза, измеренные в различные моменты времени, и кинетика изменения транспортного коэффициента рассеяния (б), коэффициента рассеяния (г) и фактора анизотропии рассеяния (е) склеры глаза, измеренная на нескольких длинах волн, при воздействии на образец водным 30%-ным раствором глюкозы. Символы соответствуют экспериментальным данным

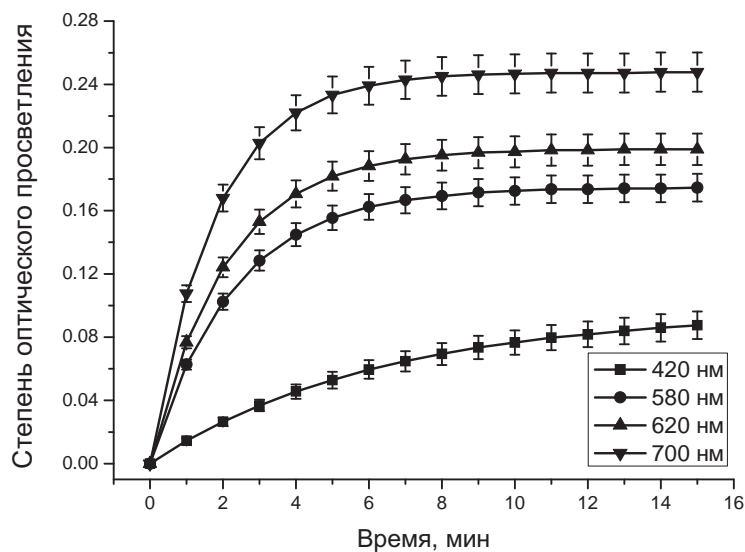


Рис. 4. Степень оптического просветления склеры глаза, измеренная на нескольких длинах волн, при воздействии на образец водным 30%-ным раствором глюкозы. Символы соответствуют экспериментальным данным

Заключение

В работе исследовано оптическое просветление склеры глаза человека *in vitro* под действием водного 30%-ного раствора глюкозы. Показано, что водный 30%-ный раствор глюкозы является достаточно эффективным просветляющим агентом, приводящим к существенному (более 20% в красной области спектра) снижению коэффициента рассеяния, что проявляется в снижении отражения и увеличении пропускания образцов биоткани. Коэффициент поглощения при этом не изменяется. Полученные результаты могут быть использованы при разработке новых и оптимизации существующих методов оптической диагностики и терапии глазных заболеваний.

Список литературы

1. Гундорова Р. А., Малаев А. А., Южаков А. М. Травмы глаза. М.: Медицина, 1986. С. 98–103.
2. Котелянский Э. О. Внутриглазные опухоли. М.: Медицина, 1974. С. 42–49.
3. Кон И. Л. Исследование светопропускания склеры *in vitro* и возможность его увеличения при воздействии производных триидбензойной кислоты: дис. ... канд. мед. наук. Саратов, 1997. 122 с.
4. Александрова Н. Н., Сапрыкин П. И. Трансклеральная лазеркоагуляция цилиарного тела в лечении абсолютно болящей глаукомы // Офтальмологический журн. 1985. Т. 8. С. 477–479.
5. Sacks Z. S., Kurtz R. M., Juhasz T., Mourau G. A. High precision subsurface photodistribution in human sclera // J. Biomed. Opt. 2002. Vol. 7(3). P. 442–450.
6. Кашинцева Л. Т., Багиров Н. А. Применение низких энергий лазерного излучения при латентной глаукоме // Офтальмологический журн. 1995. Т. 3. С. 138–141.
7. Bakutkin V. V., Karimov R. N., Tcherviakova O. V. Transscleral laser cyclocoagulation in treatment of non-compensated glaucoma // Proc. SPIE. 2001. Vol. 4241. P. 338–343.
8. Смольянинова И. Л., Каценко Т. П., Аникина Е. Б., Проскурина О. В. Возможность применения низкоэнергетического лазерного воздействия на цилиарное тело при оптическом нистагме // Вестн. офтальмологии. 1995. Т. 3. С. 15–17.
9. Аветисов Э. С., Маслова И. П., Булач Э. Х. О физических и гистохимических свойствах склеры при эметропии и миопии // Вестник офтальмологии. 1971. № 1. С. 9–12.
10. Леонтьева Т. В. Широкопольная безрефлексная стереоофтальмоскопия с трансклеральным освещением: дис. ... канд. мед. наук. СПб., 1991.
11. Genina E. A., Bashkatov A. N., Tuchin V. V. Tissue optical immersion clearing // Expert Review of Medical Devices. 2010. Vol. 7(6). P. 825–842.
12. Zhu D., Larin K., Luo Q., Tuchin V. V. Recent progress in tissue optical clearing // Laser & Photonics Reviews. 2013. Vol. 7(5). P. 732–757.
13. Genina E. A., Bashkatov A. N., Sinichkin Yu. P., Yanina I. Yu., Tuchin V. V. Optical clearing of biological tissues: prospects of application in medical diagnostics and phototherapy // J. Biomedical Photonics & Engineering. 2015. Vol. 1(1). P. 22–58.
14. Tuchin V. V. Optical Clearing of Tissues and Blood. PM 154, SPIE Press, Bellingham, WA, 2005. 254 p.
15. Генина Э. А., Башкатов А. Н., Синичкин Ю. П., Тучин В. В. Оптическое просветление склеры глаза



- in vivo* под действием глюкозы // Квантовая электроника. 2006. Т. 36(12). С. 1119–1124.
16. Zaman R. T., Rajaram N., Nichols B. S., Rylander III H. G., Wang T., Tunnell J. W., Welch A. J. Changes in morphology and optical properties of sclera and choroidal layers due to hyperosmotic agent // J. Biomed. Opt. 2011. Vol. 16 (7). 077008.
 17. Genina E. A., Bashkatov A. N., Kamenskikh I. D., Kolbenev I. O., Kamenskikh T. G., Tuchin V. V. OCT/LCT monitoring the drug effect on the human cornea structure *in vivo* // J. of Biomedical Photonics & Engineering. 2015. Vol. 1(1). P. 77–80.
 18. Larin K. V., Ghosn M. G., Bashkatov A. N., Genina E. A., Trunina N. A., Tuchin V. V. Optical clearing for OCT image enhancement and in-depth monitoring of molecular diffusion // IEEE J. of Selected Topics in Quantum Electronics. 2012. Vol. 18(3). P. 1244–1259.
 19. Alekhin A. A., Ionin A. A., Kozhushko S. E., Kourlyyova I. M., Kudryashov S. I., Kuz'min K. K., Likhvansteva V. G., Samoylov M. V., Seleznev L. V., Sinitsyn D. V., Zakharov S. D. *In vitro* femtosecond laser subsurface microdisruption inside human cornea and pre-cleared sclera // Laser Physics Letters. 2010. Vol. 7(6). P. 463–466.
 20. Башкатов А. Н., Генина Э. А., Синичкин Ю. П., Кочубей В. И., Лакодина Н. А., Тучин В. В. Определение коэффициента диффузии глюкозы в склере глаза человека // Биофизика. 2003. Т. 48(2). С. 309–313.
 21. Genina E. A., Bashkatov A. N., Zubkova E. A., Kamenskikh T. G., Tuchin V. V. Measurement of Retinalamin diffusion coefficient in human sclera by optical spectroscopy // Optics and Lasers in Engineering. 2008. Vol. 46. P. 915–920.
 22. Генина Э. А., Башкатов А. Н., Тучин В. В., Гхосн М. Г., Ларин К. В., Каменских Т. Г. Диффузия кортексина в склере глаза человека // Квантовая электроника. 2011. Т. 41(5). С. 407–413.
 23. Зубкина Е. А., Генина Э. А., Башкатов А. Н., Тучин В. В. Оптическое просветление тканей глаза // Изв. Самар. науч. центра РАН. 2011. Т. 13(4). С. 588–594.
 24. Bashkatov A. N., Genina E. A., Kochubey V. I., Lakodina N. A., Tuchin V. V. Study of osmotic liquids diffusion within sclera // Proc. SPIE. 2000. Vol. 3908. P. 266–276.
 25. Bashkatov A. N., Genina E. A., Kochubey V. I., Gavrilova A. A., Kamenskikh T. G., Galanzha V. A., Tuchin V. V. Optical clearing of human eye sclera under the action of glucose solution // Proc. SPIE. 2007. Vol. 6535. 653515.
 26. Bashkatov A. N., Genina E. A., Kochubey V. I., Kamenskikh T. G., Tuchin V. V. Optical clearing of human eye sclera // Proc. SPIE. 2009. Vol. 7163. 71631R.
 27. Ghosn M. G., Tuchin V. V., Larin K. V. Nondestructive quantification of analyte diffusion in cornea and sclera using optical coherence tomography // Invest. Ophthalmol. & Vis. Sci. 2007. Vol. 48(6). P. 2726–2733.
 28. Ghosn M. G., Carbajal E. F., Befrui N. A., Tuchin V. V., Larin K. V. Differential permeability rate and percent clearing of glucose in different regions in rabbit sclera // J. Biomed. Opt. 2008. Vol. 13(2). 021110.
 29. Ghosn M. G., Carbajal E. F., Befrui N. A., Tuchin V. V., Larin K. V. Concentration effect on the diffusion of glucose in ocular tissues // Optics in Lasers in Engineering. 2008. Vol. 46. P. 911–914.
 30. Prahl S. A., van Gemert M. J. C., Welch A. J. Determining the optical properties of turbid media by using the adding-doubling method // Appl. Opt. 1993. Vol. 32(4). P. 559–568.
 31. Башкатов А. Н., Тучин В. В. Расчет фактора анизотропии склеры глаза человека в приближении скалярной теории дифракции // Проблемы оптической физики : материалы Междунар. молодежной науч. школы по оптике, лазерной физике и биофизике. Саратов : Изд-во Саратов. ун-та, 2000. С. 149–151.
 32. Tuchina D. K., Shi R., Bashkatov A. N., Genina E. A., Zhu D., Luo Q., Tuchin V. V. Ex vivo optical measurements of glucose diffusion kinetics in native and diabetic mouse skin // J. of Biophotonics. 2015. Vol. 8(4). P. 332–346.

УДК 535.361; 610.849.19; 618.723

ЖИДКОКРИСТАЛЛИЧЕСКИЙ МОДУЛЯТОР НА ОСНОВЕ ВОЛНОВОДНОГО РЕЖИМА В ТВИСТ-СТРУКТУРЕ С БОЛЬШИМ УГЛОМ ЗАКРУТКИ

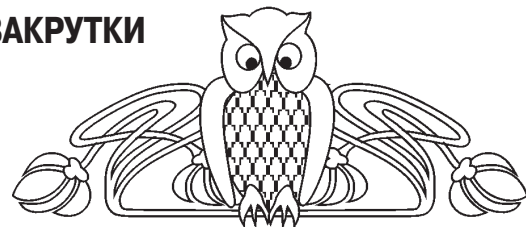
Г. В. Симоненко¹, С. А. Студенцов², В. А. Ежов³

¹Саратовский государственный университет

²ООО Научно-производственное предприятие «Фотон», Саратов

³Институт общей физики им. А. М. Прохорова РАН, Москва

E-mail: gvsim1960@hotmail.com



На основе анализа цветовых характеристик различных ЖК устройств отображения информации введен критерий для оценки ахроматичности черно-белого изображения. Для адекватного описания оптических свойств ЖК модулятора предложен необ-

ходимый набор трех характеристик: средний по спектру контраст модулятора; среднее по спектру пропускание модулятора для состояния «открыто»; ахроматичность модулятора для состояния «открыто». Выполнено компьютерное моделирование оптических



характеристик ЖК модулятора, работающего в волноводном режиме на основе ЖК структуры с углом закрутки 270° . Для подобного ЖК устройства найдены значения оптимальных параметров. **Ключевые слова:** ЖК модулятор, оптические характеристики, компьютерное моделирование.

The Liquid Crystal Modulator on the Basis of the Waveguide Mode in the Twist Structure with the High Twist Angle

G. V. Simonenko, S. A. Studentsov, V. A. Ehzov

On the basis of the analysis of color characteristics of different LC display units the criterion for an assessment of an unchromaticity of black-and-white images is entered. For the adequate description of the optical properties of the LC modulator the necessary set of three characteristics is offered: contrast of the modulator, average on a range; the average on a range passage of the modulator for a status «is opened»; a modulator achromatichnost is «open» for a status. Computer simulation of optical characteristics of LC modulator working in the waveguide mode on the basis of LC structure with twist angle 270° is executed. For this LC device values of optimum parameters are found.

Key words: LC modulator, optical characteristics, computer simulation.

DOI: 10.18500/1817-3020-2015-15-3-24-30

Введение

В настоящее время большинство мониторов используют жидкокристаллическую (ЖК) панель, работающую на основе электрооптического твист-эффекта с углом закрутки структуры 90° [1–4]. Преимущество этой жидкокристаллической технологии состоит в том, что ее стоимость невелика, а электрооптические характеристики ЖК устройств имеют высокие показатели. Поэтому подобные ЖК дисплеи сегодня являются самыми популярными. Заметим, что панели на твист-эффекте главным образом широко используются на рынке настольных дисплеев с размерами экрана от 15 до 28 дюймов [2]. Другой разновидностью ЖК панелей, получивших наиболее широкое применение, являются ЖК устройства небольшого размера (например, 190×54 мм), использующие явление интерференции поляризованных лучей в ЖК структурах с углами закрутки более 90° [5]. Как правило, такие устройства не являются черно-белыми или полноцветными, что ограничивает область их применения. С другой стороны, в литературе отсутствуют данные об использовании ЖК структур с большими углами закрутки, которые работают в волноводном режиме. Речь идет о структурах ЖК с углом закрутки 270° , которые используются обычно в режиме интерференции поляризованных лучей [6]. Под волноводным режимом в закрученной

структуре ЖК понимается явление вращения плоскости поляризации поляризованного света слоем ЖК, при котором угол поворота плоскости поляризации света равен углу закрутки структуры ЖК. Такая ориентационная структура ЖК по сравнению с «классической» твист-структурой отличается высокой степенью мультиплексирования при прочих равных параметрах [7], что позволяет использовать подобные ЖК панели для создания простых и дешевых полноцветных устройств малого и среднего размера. Поэтому целью данной работы является исследование оптических характеристик ЖК устройства типа оптического затвора, работа которых основана на использовании волноводного режима в ЖК структуре с углом закрутки 270° в зависимости от его конструктивных параметров. В задачи исследования входило определение минимально необходимого набора оптических характеристик ЖК устройства для адекватного описания его оптических свойств, а также поиск оптимальных значений конструктивных параметров ЖК устройства. Для решения поставленных задач нами был применен метод компьютерного моделирования, который в силу сложности натурного эксперимента в технике ЖК устройств отображения информации является стандартным средством для этих целей [8, 9].

Оптические характеристики ЖК устройства

1. Стандартные оптические характеристики

Для адекватного описания характеристик ЖК устройства отображения или обработки информации с целью выбора оптимальной его конструкции обычно используется следующий набор оптических характеристик [7–9]:

- среднее по спектру или для определенных длин волн пропускание (отражение) ЖК устройства в состоянии «включено» или «выключено»;
- координаты цвета в цветовом треугольнике и ахроматичность изображения для состояний «включено» или «выключено»;
- средний по спектру контраст изображения или контраст для определенных длин волн;
- индикатриса среднего или на определенной длине волны контраста изображения.

Обычно [7] ЖК устройство характеризуется двумя значениями пропускания для двух состояний:

- 1) «выключено» – управляющее напряжение на затвор не подано или его значение ниже порогового;
- 2) «включено» – на затвор подано напряжение выше порогового значения.



Между этими двумя состояниями должен быть обеспечен требуемый контраст изображения. В этом случае среднее по спектру пропускание устройства T_{off} для состояния «выключено» («включено» T_{on}) определим следующим образом [8, 9]:

$$T_{off} = \frac{\int_{400}^{800} T_{off\lambda} I_{\lambda} K_{\lambda} d\lambda}{\int_{400}^{800} I_{\lambda} K_{\lambda} d\lambda}, \quad T_{on} = \frac{\int_{400}^{800} T_{on\lambda} I_{\lambda} K_{\lambda} d\lambda}{\int_{400}^{800} I_{\lambda} K_{\lambda} d\lambda}, \quad (1)$$

где $T_{off(on)\lambda}$ – пропускание устройства в состоянии «выключено» («включено») на длине волны λ ; I_{λ} – спектральное распределение источника излучения D_{65} (или какого-либо другого источника излучения); K_{λ} – спектральная чувствительность глаза.

Тогда средний по спектру контраст изображения C вычисляется [8, 9]:

$$C = \frac{T_{off}}{T_{on}}. \quad (2)$$

Координаты цвета (x, y) определяются с помощью известных выражений [10]:

$$\begin{aligned} x &= \int_{400}^{800} \bar{x}(\lambda) T_{\lambda} I_{\lambda} d\lambda / G, \quad y = \\ &= \int_{400}^{800} \bar{y}(\lambda) T_{\lambda} I_{\lambda} d\lambda / G, \quad (3) \\ G &= \int_{400}^{800} \bar{x}(\lambda) T_{\lambda} I_{\lambda} d\lambda + \int_{400}^{800} \bar{y}(\lambda) T_{\lambda} I_{\lambda} d\lambda + \\ &+ \int_{400}^{800} \bar{z}(\lambda) T_{\lambda} I_{\lambda} d\lambda, \end{aligned}$$

где $x(\lambda)$, $y(\lambda)$, $z(\lambda)$ – кривые смещения трех основных цветов в цветовой системе координат (x, y, z) .

Индикатриса контраста – зависимость контраста изображения от угла падения φ и азимута ζ плоскости падения света. При этом азимут плоскости падения света обычно отсчитывается от направления ориентации молекул ЖК на фронтальной поверхности ЖК ячейки по часовой стрелке. Часто для характеристики угловой зависимости контраста вводят понятие угла обзора устройства Ψ . В нашем случае углом обзора ЖК устройства называется угол между двумя азимутальными направлениями плоскости падения света при фиксированном угле падения света, для которых контраст изображения C не ниже определенного уровня [9].

2. Ахроматичность

Как правило, для характеристики цвета устройства применяются спектры пропускания и вычисленные на их основе цветовые координаты. Однако такой набор усложняет анализ влияния различных конструктивных параметров на оптические характеристики устройства. Известно, что для получения полноцветного изображения необходимо, чтобы во всем видимом диапазоне устройство имело одинаковый контраст. Поэтому нами предлагается поход к анализу цветовых характеристик устройства, основанный на понятии ахроматичности.

Обычно под ахроматичностью понимается отсутствие цвета у исследуемого объекта [11]; иными словами, ахроматичность соответствует цветовой разности между точкой белого цвета на цветовом треугольнике и точкой цвета данного объекта. Поэтому под ахроматичностью H мы будем понимать расстояние текущей цветовой точки устройства на цветовом треугольнике от точки белого цвета, например источника D_{65} , т.е.

$$H = \sqrt{(x - x_{65})^2 + (y - y_{65})^2}, \quad (4)$$

где (x, y) – координаты цвета устройства, (x_{65}, y_{65}) – координаты источника D_{65} .

Источник D_{65} нами выбран из-за того, что его спектр излучения соответствует спектру естественного солнечного света. В качестве источника излучения может быть выбран любой другой источник, тогда для определения ахроматичности необходимо использовать цветовые координаты соответствующего источника оптического излучения. Теперь определим условие, при выполнении которого устройство можно будет считать ахроматичным. На рис. 1 показан цветовой треугольник в системе МКО XYZ 1931. Построим около точки D_{65} окружность такого радиуса, чтобы она вся целиком оставалась в области белого цвета W (на рис. 1 область Ah). Тогда все точки, которые находятся внутри этой окружности, будут считаться белыми (т.е. ахроматичными).

Из рис. 1 видно, что условием ахроматичности является

$$H \leq 0,05. \quad (5)$$

Поясним на примере смысл введения условия (5) для ахроматичности H . В таблице показаны оптические характеристики (средние по спектру пропускание в состоянии «выключено» (T_{off}) и контраст C , а также контрасты для определенных



длин волн, координаты цветы для состояния «выключено») для ЖК устройства, использующего различные электрооптические эффекты и имеющие сравнимые оптические характеристики. Наша цель – выбрать устройство, которое имеет одинаковую глубину модуляции во всем видимом диапазоне. Обычно для этой цели используется весь набор оптических характеристик ЖК затвора, перечисленный выше. Однако если ввести в рассмотрение понятие ахроматичности с соотношением (5), то достаточно ограничиться только сравнением значений среднего по спектру пропускания в состоянии «выключено» (или «включено»), среднего по спектру контраста и ахроматичности устройства для состояния «выключено» (или «включено»). В данном примере должно быть выбрано устройство с оптическими характеристиками, представленными во второй строке таблицы, так как значение ахроматичности для него существенно ниже и удовлетворяет соотношению (5).

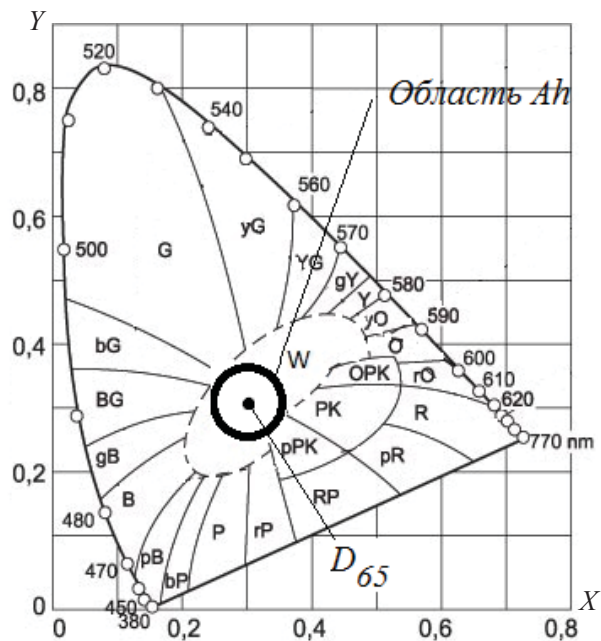


Рис. 1. Цветовой треугольник и понятие ахроматичности (рисунок взят из работы [12])

Оптические характеристики ЖК затвора

T_{off}	C	x	y	$C (\lambda = 450 \text{ нм})$	$C (\lambda = 550 \text{ нм})$	$C (\lambda = 660 \text{ нм})$	H
0.35	303	0.36	0.38	91	307	127	0.058
0.38	371	0.34	0.35	132	371	137	0.023

3. Необходимый набор характеристик

Исходя из вышеизложенного, для анализа цветовых характеристик чёрно-белого устройства (или полноцветного) нами предлагается использовать понятие ахроматичности совместно с соотношением (5). Отметим, что состояние устройства «выключено» или «включено», для которого вычисляются перечисленные выше характеристики, определяется тем, пропускает свет в этом состоянии устройство или нет. Для большинства ЖК устройств состояние «выключено» соответствует максимальному пропусканию, и контраст изображения в этом случае положительный. Исходя из этого, для анализа чёрно-белого ЖК устройства нами предлагается использовать следующий набор оптических характеристик:

- среднее по спектру пропускание ЖК устройства в состоянии «выключено»;
- средний по спектру контраст изображения;
- ахроматичность устройства в состоянии «выключено» совместно с соотношением (5).

Отметим, что соотношение (5) для ахроматичности введено только для цветовой системы

координат XYZ МКО 1931, для других цветовых систем это условие должно быть изменено.

4. Конструктивные параметры ЖК затвора, влияющие его на оптические характеристики

Как известно [8–9, 13], существует большое число параметров ЖК устройства, которые определяют его электрооптические и оптические характеристики. Однако для большинства ЖК устройств характерно то, что у ЖК модулятора существует только два рабочих состояния: закрытое, когда излучение сквозь него не проходит; открытое, когда излучение должно проходить сквозь него с максимальным коэффициентом пропускания. Часто открытое состояние соответствует нулевому управляющему напряжению (или напряжению ниже порога Фредерикса), а закрытое состояние – управляющему напряжению значительно выше порогового напряжения. В этом случае открытое состояние соответствует состоянию «выключено», закрытое – «включено». В силу этого большинство физических и технических параметров не оказывают влияния на оптические характеристики ЖК затвора. Ис-



ключением являются четыре параметра, которые всегда определяют оптические характеристики затвора: толщина ЖК слоя (d); анизотропия показателя преломления ЖК (Δn); угол закрутки структуры ЖК (Φ_T); угол ориентации входного (или выходного) поляризатора (θ). Влияние величин углов Φ_T и θ на оптические характеристики в волноводном режиме обычно не учитывается, так как используются углы закрутки ЖК структуры, кратные нечетному числу 90° , а ориентации входного и выходного поляризаторов в этом случае всегда совпадают с направлением натирания на первой и второй подложках ЖК ячейки [7–8]. Кроме того, на оптические характеристики серьезное влияние оказывает отношение толщины ЖК слоя (d) к величине шага спирали ЖК структуры (p), что рассмотрено в данной работе.

В статье приведены данные по влиянию величин d , Δn и d/p на среднее по спектру пропускание в состоянии «выключено» T_{off} ЖК устройства, средний по спектру контраст и ахроматичность ЖК устройства в состоянии «выключено» H . В связи со сложностью натурального моделирования нами для исследования характеристик и поиска оптимальных параметров ЖК затвора использовалась система компьютерного

моделирования *MOUSE-LCD* [14]. При моделировании электрооптических характеристик ЖК устройства использовались данные для ЖКМ ZLI 4792 [15] ($K_{11} = 10.5 \cdot 10^{-6}$ дин, $K_{22} = 6.9 \cdot 10^{-6}$ дин, $K_{33} = 16.8 \cdot 10^{-6}$ дин, $\varepsilon_{\perp} = 4.88$, $\varepsilon_{\parallel} = 13.54$, $\Delta n(436 \text{ нм}) = 0.104$, $\Delta n(546 \text{ нм}) = 0.1$, $\Delta n(633 \text{ нм}) = 0.096$). Во всех расчетах эти физические параметры оставались постоянными. При исследовании влияния величины оптической анизотропии на оптические характеристики ЖК устройства дисперсия показателей преломления принималась такой же, как у ЖК ZLI 4792. Ниже приведены результаты компьютерного моделирования.

Результаты и их обсуждение

На рис. 2 и 3 представлены результаты компьютерного моделирования оптических характеристик твист-ячейки с углом закрутки структуры 270° в зависимости от толщины ЖК слоя и оптической анизотропии. Зависимости $T_{off} = T_{off}(d)$ (см. рис. 2, а) и $C = C(d)$ (см. рис. 2, б) имеют вид кривых с максимумами, что объясняется тем, что условие волноводного режима для этой структуры выполняется только при условии $\Delta n \cdot d \approx 0.6$ мкм. Отклонение от этого

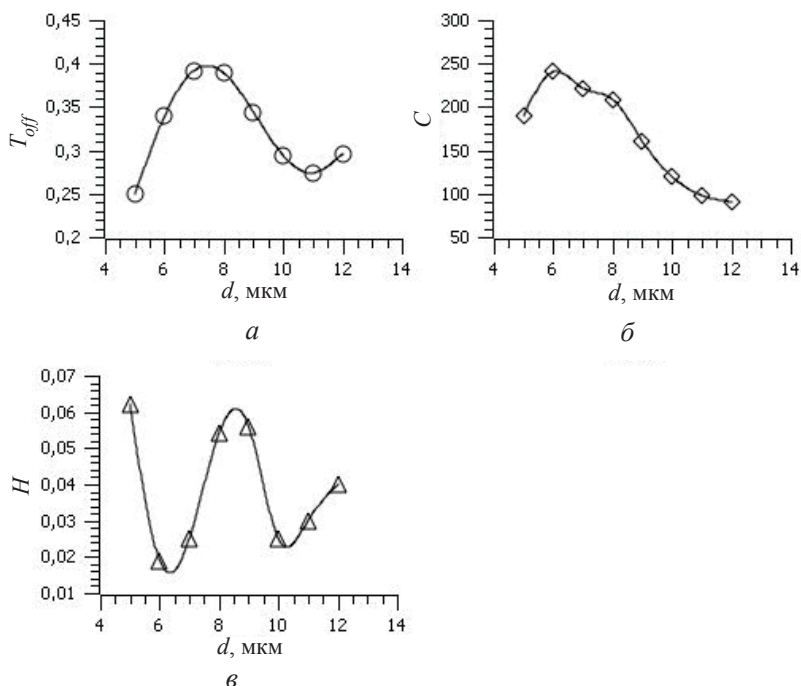


Рис. 2. Зависимость оптических характеристик твист-ячейки с углом закрутки структуры 270° от толщины ЖК слоя: а – зависимость среднего по спектру пропускания в состоянии «выключено» от толщины ЖК слоя; б – зависимость среднего по спектру контраста от толщины ЖК слоя; в – зависимость ахроматичности в состоянии «выключено» от толщины ЖК слоя

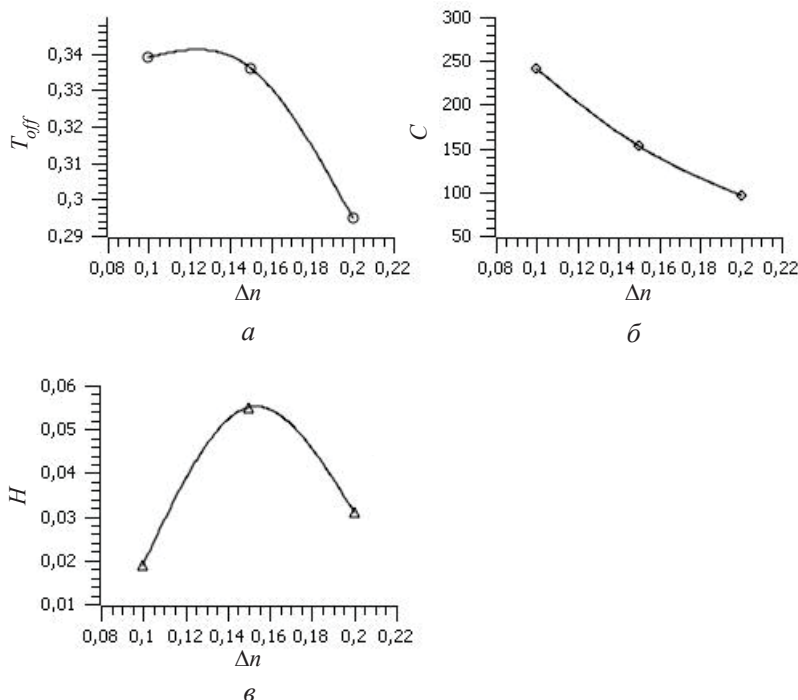


Рис. 3. Зависимость оптических характеристик твист-ячейки с углом закрутки структуры 270° от оптической анизотропии ЖК Δn : а – зависимость среднего по спектру пропускания в состоянии «выключено» от оптической анизотропии ЖК; б – зависимость среднего по спектру контраста от оптической анизотропии ЖК; в – зависимость ахроматичности в состоянии «выключено» от оптической анизотропии ЖК

условия приводит как к уменьшению пропускания в состоянии «выключено», так и к падению контраста. Условие волноводного режима в этом случае не так критично к толщине ЖК слоя, как для классического твист-эффекта с 90° углом закрутки структуры. Отклонение толщины ЖК слоя от оптимального значения может составлять до ± 1 мкм. Ахроматичность устройства в состоянии «выключено» также не сильно зависит от d , и почти во всем диапазоне изменения толщины $H = 0.05 \pm 0.01$ (см. рис. 2, в).

Аналогичные выводы можно сделать относительно зависимости оптических характеристик такого модулятора от оптической анизотропии ЖК Δn . Отличие состоит в том, что интервал изменения Δn гораздо уже (см. рис. 3).

На рис. 4 представлена зависимость контраста твист-ячейки с углом закрутки структуры 270° от отношения толщины ЖК слоя d к шагу спирали p . Пропускание T_{off} и ахроматичность H от величины d/p не зависят, так как в состоянии «выключено» определяются только величиной $\Delta n \cdot d$, которая в данном случае постоянна. Зависимость контраста имеет вид кривой с мак-

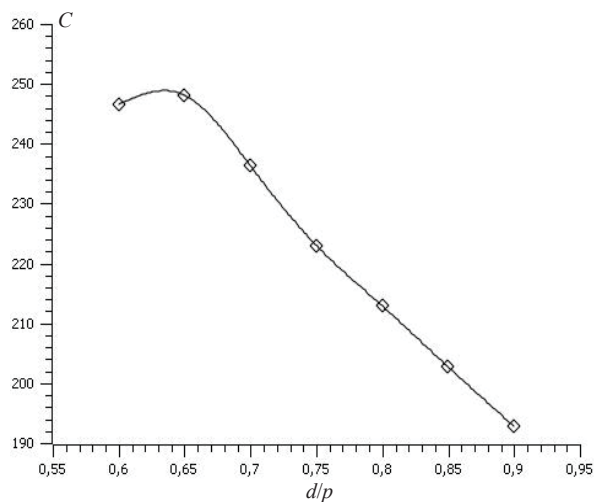


Рис. 4. Зависимость контраста твист-ячейки с углом закрутки структуры 270° от отношения толщины ЖК к шагу спирали структуры d/p

симумом, наличие которого объясняется тем, что при больших значениях d/p крутизна вольт-контрастной кривой меньше, чем при малых значениях указанного отношения. Поэтому слой ЖК более искажен при малых значениях d/p , то есть пропускание в состоянии «включено» имеет



меньшую величину. С другой стороны, изменение d/p до значений, соответствующих левой границе зоны Гранжана, приводит к появлению гистерезиса в вольт-контрастной кривой [7], поэтому в состоянии «включено» пропускание начинает расти. Поэтому кривая $C = C(d/p)$ имеет максимум.

Основные выводы

Выполненное исследование оптических характеристик ЖК затвора, работающего на основе волноводного режима в структуре ЖК с углом закрутки 270° , позволяет сделать следующие выводы.

1. На основе анализа цветовых характеристик ЖК устройств отображения информации введен критерий для оценки ахроматичности H черно-белого изображения.

2. Для различных конструкций ЖК устройств модуляции света предложен необходимый набор его оптических характеристик: среднее по спектру пропускание ЖК модулятора в состоянии «открыто»; средний по спектру контраст изображения; ахроматичность модулятора в состоянии «открыто» совместно с соотношением $H \leq 0,05$.

3. С помощью программного комплекса *MOUSE-LCD* выполнено компьютерное моделирование оптических характеристик ЖК устройства модуляции света, работающего на основе волноводного режима в ЖК структуре с углом закрутки 270° . Показано, что подобный ЖК модулятор имеет сравнимые с «классическим» твист-индикатором оптические характеристики, однако имеет более высокие значения степени мультиплексирования.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации (проект № RFMEFI60414X0032).

Список литературы

1. TN Panel Information. URL: <http://www.tnpanel.com/>
2. Simon Baker, Panel Technologies updated 17 March 2015. URL: http://www.tftcentral.co.uk/articles/panel_technologies.htm (дата обращения: 20.05.2015).
3. Пахомов С. Современные ЖК-мониторы // КомпьютерПресс. 2004. № 12. URL: <http://compress.ru/article.aspx?id=12688> (дата обращения: 20.05.2015).
4. Вялков Д. Сравнение типов матриц ЖК (LCD-, TFT-) мониторов. URL: <http://www.pc-someworld.ru/hardware/235/sravnenie-tipov-matric-zhk-lcd-tft-monitorov/> (дата обращения: 20.05.2015).
5. Каталог группы компаний ПРОМЭЛЕКТРОНИКА. URL: <http://www.promelec.ru/catalog/409/454/472/1> (дата обращения: 20.05.2015).
6. Deng-Ke, Wu Y. S. T. Fundamentals of Liquid Crystal Devices. Chichester : John Wiley & Sons, 2014. 592 p.
7. Сухаруев А. С. Жидкокристаллические индикаторы. М. : Радио и связь, 1991. 256 с.
8. Yakovlev D. A., Chigrinov V. G. Kwok Hoi-Sing Modeling and optimization of LCD optical performance. Chichester: John Wiley & Sons, Ltd. 2015. 578 p.
9. Simonenko G. V. Analysis of various liquid-crystal optical-shutter designs // J. Optical Technology. 2014. Vol. 81, № 10. P. 594–598. Doi 10.1364/JOT81.000594.
10. Шашлов А. Б., Уварова Р. М., Чуркин А. В. Основы светотехники : учебник для вузов. М. : Изд-во МГУП, 2002. 280 с.
11. Артюшин Л. Ф. Основы воспроизведения цвета в фотографии, кино и полиграфии. М. : Искусство, 1970. 548 с.
12. Буданова А. Управление цветом комбинированного светодиодного RGB-источника света // Полупроводниковая светотехника. 2010. № 3. С. 32–35.
13. Симоненко Г., Тучин В., Зимняков Д. Оптические характеристики жидкокристаллических и биологических сред. LAP LAMBERT Academic Publishing GmbH & Co.KG., 2010. 210 с.
14. Yakovlev D. A, Simonenko G. V., Tsoy V. I., Chigrinov V. G., Khokhlov N. A., Pdyachev Yu. B. LCD- design : universal system for computer simulation and optimization of electrooptical devices on the base of liquid crystal. URL: <http://proceedings.spiedigitallibrary.org/proceeding.aspx?articleid=884283> (дата обращения: 20.05.2015).
15. Merck prospect : Liquid Crystal Mixtures for Electro-Optic Displays . Darmstadt : Merck & Co, 1994. 54 p.



УДК 621.3.72.517.9

МАКЕТ МИНИАТЮРНОГО МОДУЛЯТОРА ДЛЯ СВЧ-ПРИБОРОВ

И. Н. Антонов, А. Г. Лавкин, М. Б. Мысенко,
В. П. Ерёмин, А. В. Россошанский

Саратовский государственный университет
E-mail: tmf@sgu.ru



В данной работе рассматривается макет миниатюрного модулятора для СВЧ-приборов. Модулятор состоит из задающего генератора, который обеспечивает четыре последовательности импульсов, и инвертора, коммутирующего с генератором импульсов, обеспечивающего анодное питание нагрузки. Импульсный анодный ток нагрузки стабилизируется стабилизатором тока на полевом транзисторе. Блок управления и контроля осуществляет общее управление модулятором. Оптимальная характеристика работы магнетрона обеспечивается 16-разрядным микроконтроллером.

Ключевые слова: СВЧ-прибор, генератор импульсов, анодный ток, стабилизатор тока, магнетрон, микроконтроллер, инвертор, конвертор, мостовая схема, импульсный высоковольтный трансформатор.

Model of the Miniature Modulator for Microwave Devices

I. N. Antonov, A. G. Lavkin, M. B. Mysenko,
V. P. Eryomin, A. V. Rossoshansky

In the given paper the model of the miniature modulator for microwave devices is observed. The modulator consists of the master oscillator, which provides four series of the impulses, and of the inverter commutated with the surge generator providing a plate supply of the load. The pulsing plate supply of the load is stabilized by the current regulator on the unipolar transistor. The control and check unit realize the general control of the modulator. The optimal characteristic of the work of a magnetron is provided by the 16-digit microcontroller.

Key words: microwave device, surge generator, sheath current, cur-

rent stabilizer, magnetron, microcontroller, inverter, converter, bridge circuit design, pulsing high-voltage transformer.

DOI: 10.18500/1817-3020-2015-15-3-31-35

Введение

Тенденция разработок систем радиосвязи и антенной техники – при достаточно большой дальности работы этих систем (средняя мощность 1.2 кВт и выше) – обеспечить высокую угловую точность их работы и точность по дальности (фронты импульсов менее 100 нс). Также требуется обеспечить миниатюрность исполнения соответствующих модулей таких систем. Эти требования могут выполняться лишь при переходе к сантиметровым и миллиметровым диапазонам длин волн и при использовании миниатюрных радиокомпонентов (что затрудняет процесс макетирования таких модулей) [1–6].

В данной работе рассматривается макет миниатюрного модулятора для СВЧ-приборов (макет выполнен на зарубежных чип-компонентах).

Структурная схема модулятора

Структурная схема макета модулятора приведена на рис. 1 (при наладке узлы макета оптимизируются с целью миниатюризации и замены критических компонентов).

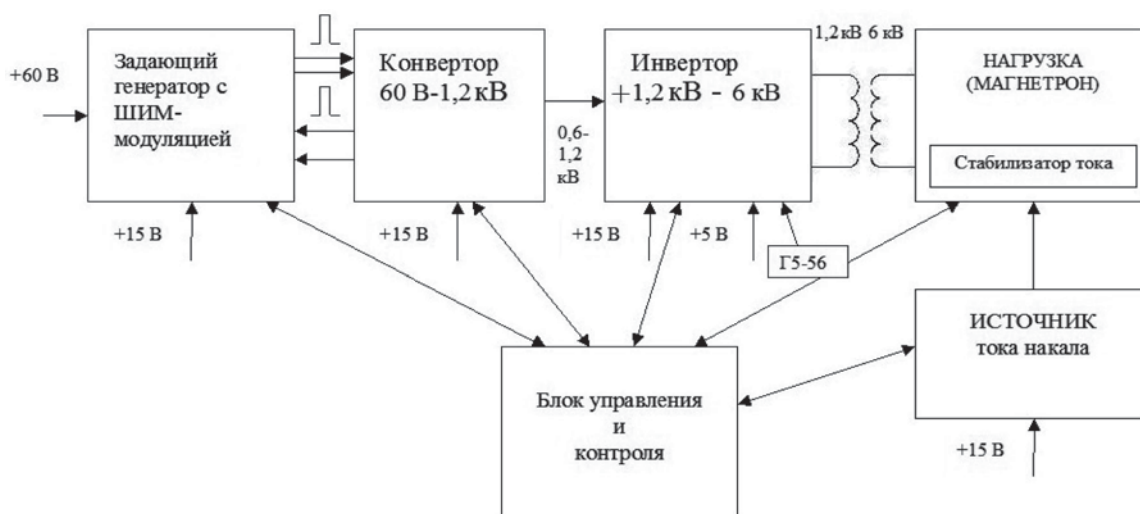


Рис. 1. Структурная схема макета модулятора



Задающий генератор (несущая частота 95 кГц) обеспечивает 4 последовательности импульсов для четырех полевых транзисторов в мостовой схеме конвертора. По цепи обратной связи с конвертора задающий генератор управляется ШИМ, тем самым обеспечивается стабилизация выходного напряжения конвертора.

Напряжение +1,2 кВ с конвертора подается на инвертор +1,2 кВ – 6 кВ.

Инвертор коммутируется генератором импульсов (Г5-56). Импульсы с инвертора обеспечивают анодное питание нагрузки.

Напряжение накала нагрузки обеспечивается конвертором «ИРБИС» (+60 В – +20 В, ток до 7 А), которое для развязки подается через инвертор и разделительный трансформатор.

Импульсный анодный ток нагрузки стабилизируется стабилизатором тока на полевом транзисторе.

Блок управления и контроля (БУК) осуществляет общее управление модулем (кон-

тролируются его электрические параметры) и обеспечивает включение анодного напряжения нагрузки при достаточном прогреве ее термокаатода. Оптимальная характеристика «напряжение-ток» (ВАХ) работы магнетрона обеспечивается 16-разрядным микроконтроллером MICRO-SHIP.

Генератор четырех последовательностей импульсов

Генератор выполнен полностью на зарубежных чип-компонентах. Задающий генератор выполнен на микросхемах MC1 (LM25037). Он обеспечивает две последовательности импульсов с ШИМ-модуляцией для стабилизации. Эти импульсы поступают на микросхемы MC2 и MC3 (1X6R), где они превращаются в четыре последовательности, поступающие на 4 транзистора в мостовой схеме конвертора (рис. 1, блок 2). Цепочки V7 - R3 и V8 - R4 формируют фронты импульсов в последовательностях.

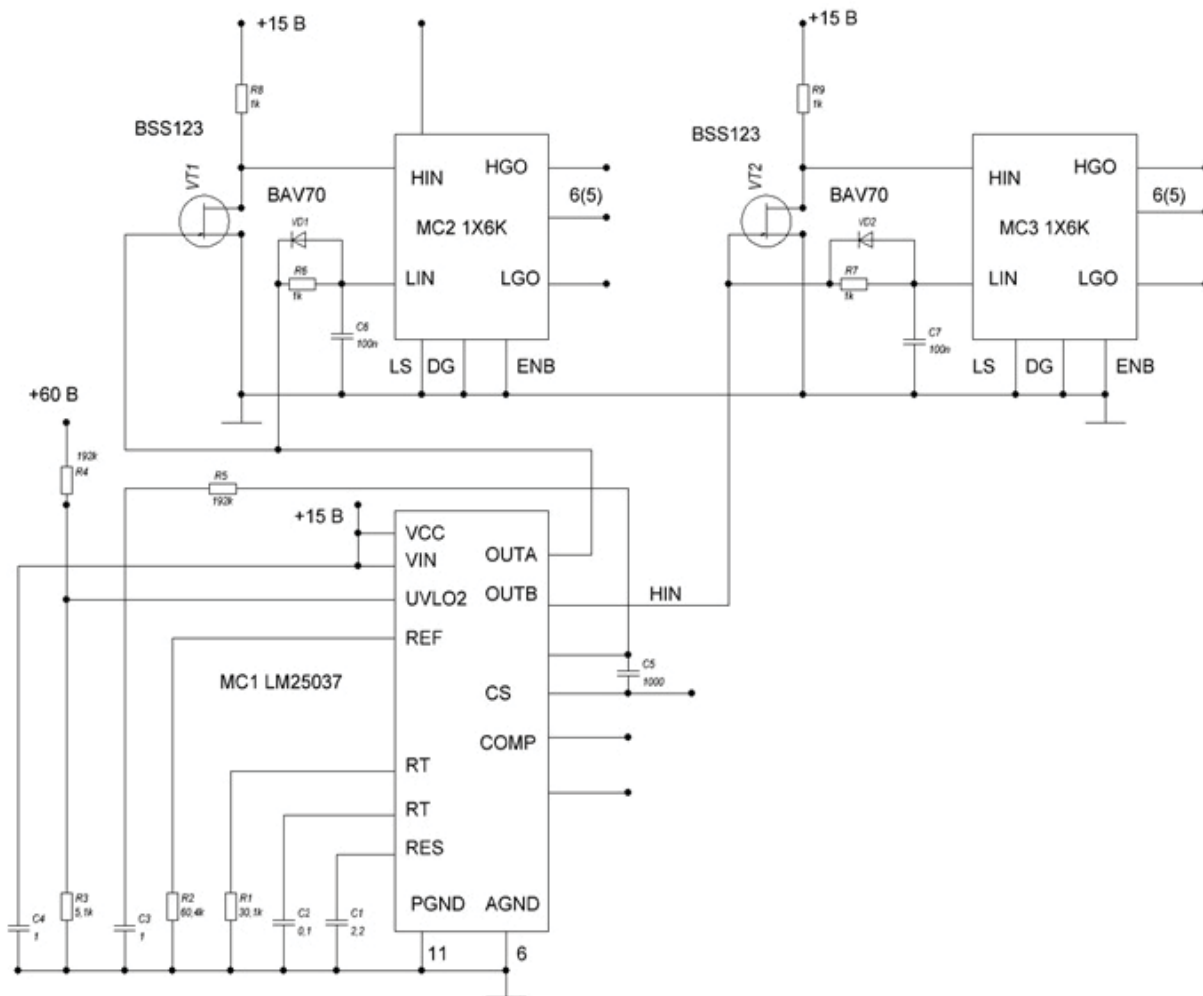


Рис. 2. Задающий генератор



Транзисторы V1 и V2 инвертируют эти последовательности импульсов по фазе. В микросхеме MC1 имеется режим аварийного прекращения генерации импульсов при снижении напряжения питания на 20% (вход микросхемы MC1 UVL02).

Конвертор +60 В – +1200 В

Конвертор преобразует напряжение +60 В в регулируемое 0,5 – 1 кВ. Он собран на четырех транзисторах V3 - V6 (типа 1RFP). Транзисторы V3 и V4 работают в режиме рекуперации энергии.

Дроссели L1 и L2 позволяют уменьшить вдвое обмоточные данные силового трансформатора T2 (1:10). Измерительный трансформатор T1 формирует напряжение обратной связи для задающего генератора. Контроль силового напряжения выполняется на сглаживающем фильтре C32-35 – C15-18. Выходное напряжение подается на инвертор (третий блок рис. 1). Сигнал обратной связи для регулировки ШИМ-модуляции задающего генератора (выходного напряжения конвертора) регулируется потенциометром R25.

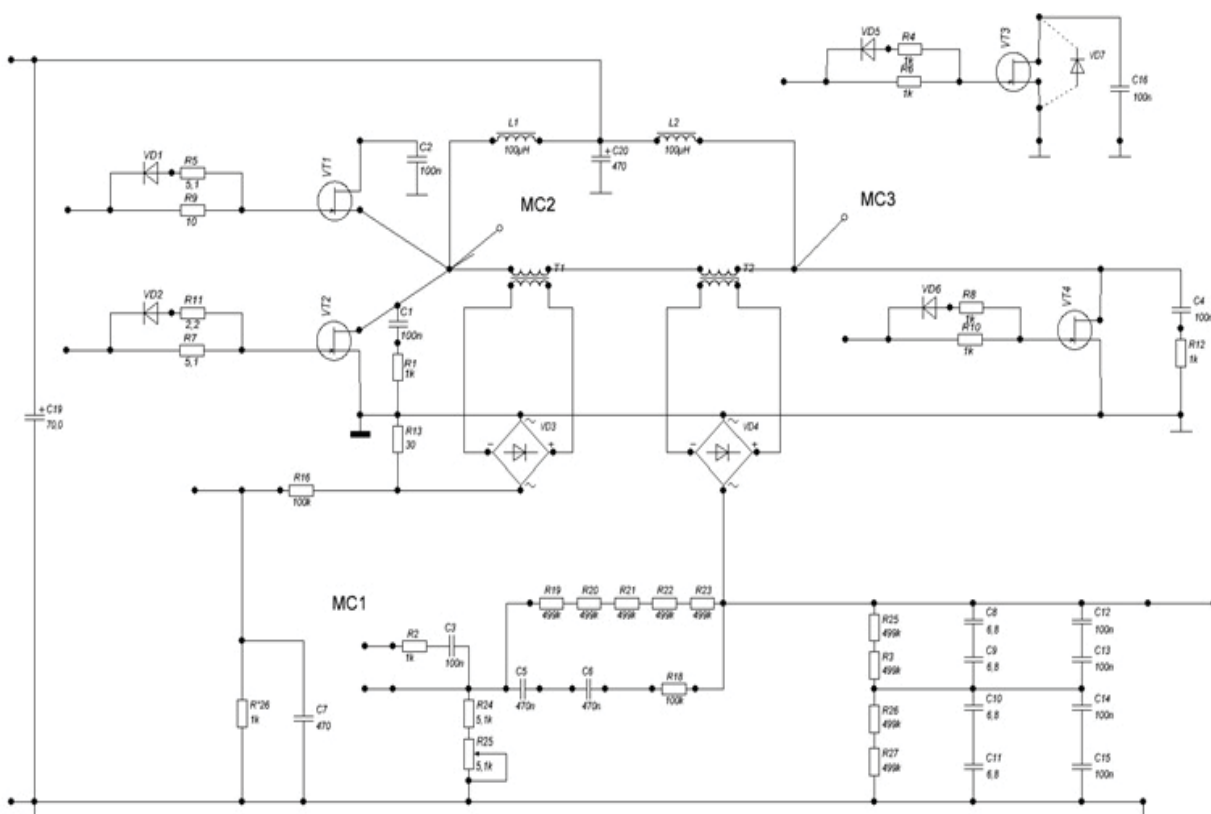


Рис. 3. Конвертор +60 – +1200 В

Инвертор +1.2 кВ – 6 кВ

Инвертор преобразует напряжение 0,5–1 кВ в импульсы 2,5 кВ – 5 кВ. Запуск инвертора выполняется от внешнего генератора (типа Г5-56). Инвертор выполнен на транзисторах CMF1012OD. Напряжение с инвертора через импульсный высоковольтный трансформатор и выпрямитель диодной цепочки подается на нагрузку (магнетрон) (рис. 4, 5). Выходное напряжение стабилизируется по току (рис. 7), тем самым стабилизируется режим работы окончательной нагрузки (магнетрона).

Цепь нагрузки модулятора (магнетрон)

Цепь накала катода нагрузки

Накал катода обеспечивается конвертером ИРБИС с гальванической развязкой от анодного напряжения.

Стабилизатор анодного тока нагрузки

Стабилизатор построен на операционном усилителе LM8261, работа которого регулируется потенциометром. Оптрон АОТ126А обеспечивает защиту стабилизатора от перегрузки.

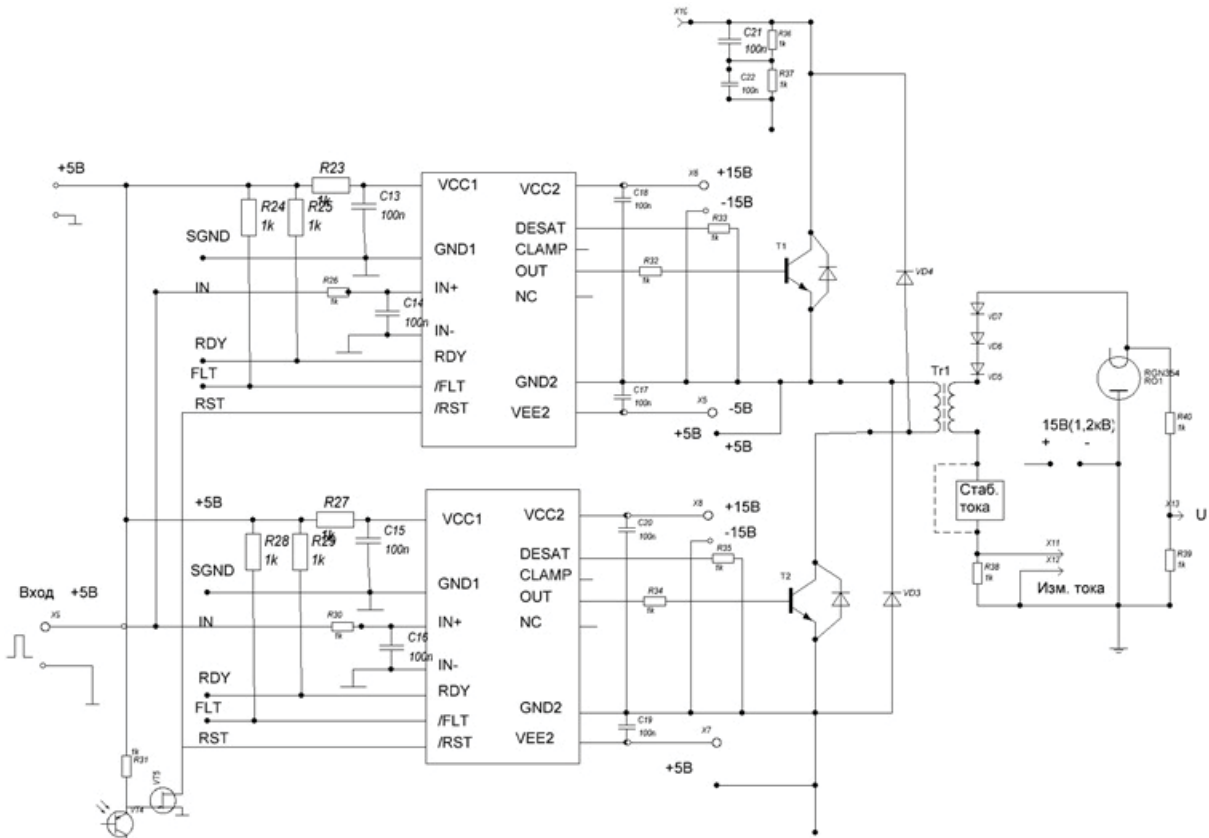


Рис. 4. Инвертор +1.2 – 6 кВ

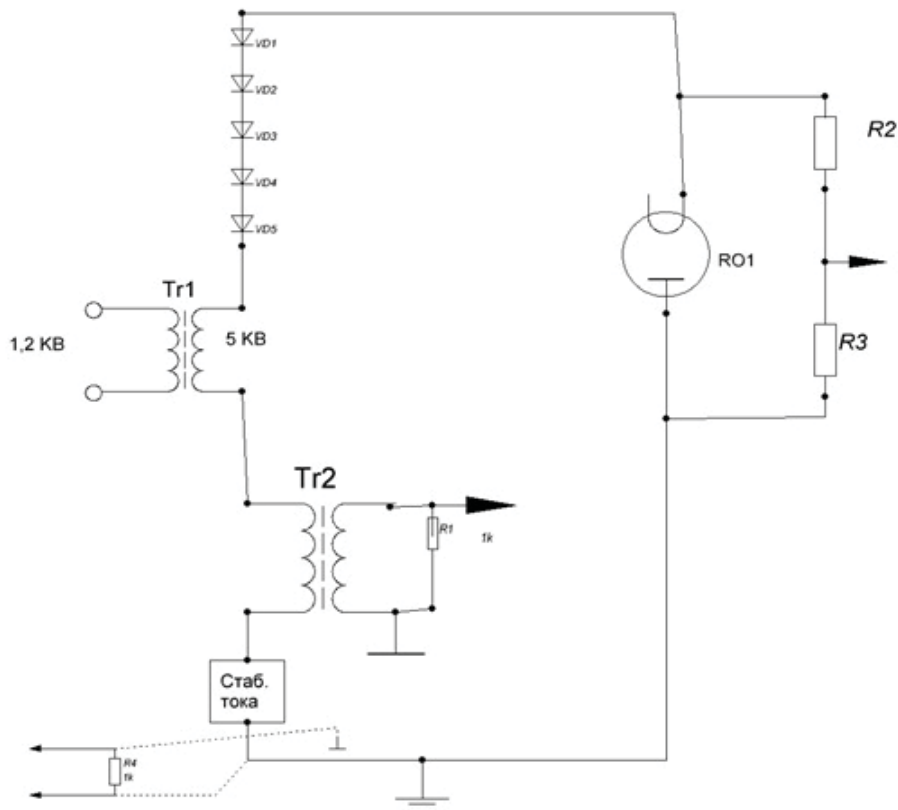


Рис. 5. Цепь нагрузки модулятора



Рис. 6. Цепь накала катода нагрузки

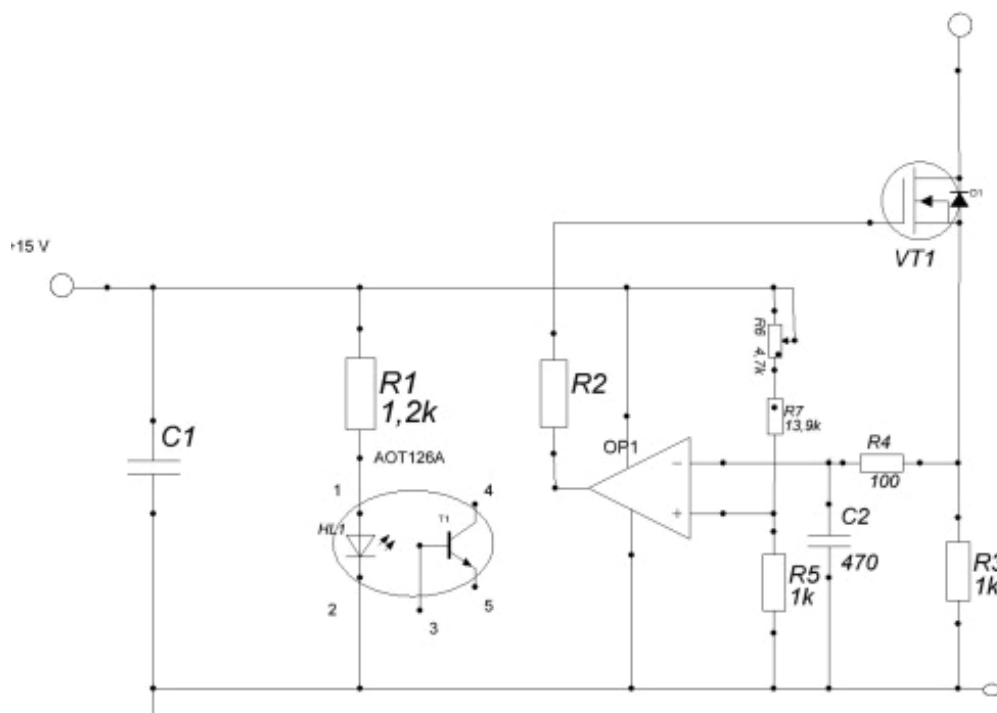


Рис. 7. Стабилизатор анодного тока нагрузки

Таким образом, в работе обсуждаются возможности миниатюрного модулятора для антенной техники. Параметры модулятора оптимизируются при работе с макетом.

Список литературы

1. Москатов Е. А. Источники питания. 12-е изд. СПб. : МК-пресс, 2011. 208 с.
2. Семенов Б. Ю. Силовая электроника. М. : Солон-пресс, 2011. 416 с.
3. Березин О. К. Источники электропитания РЭА. М. : Горячая линия, 2000. 400 с.
4. Царенко А., Серёгин Д. Новые схемы статических преобразователей и их сравнительный анализ // Силовая электроника. Тематическое приложение к журналу «Компоненты и технологии». СПб. : Файнстрит. 2007. № 3. С. 59–66.
5. Сукер К. Силовая электроника. М. : Додека, 2008. 252 с.
6. Редди С. Р. Основы силовой электроники. М. : Техносфера, 2006. 288 с.



УДК 537.86

СОПОСТАВЛЕНИЕ МЕТОДОВ ДИАГНОСТИКИ ФАЗОВОЙ СИНХРОНИЗОВАННОСТИ ПО ТЕСТОВЫМ ДАННЫМ, МОДЕЛИРУЮЩИМ НЕСТАЦИОНАРНЫЕ СИГНАЛЫ БИОЛОГИЧЕСКОЙ ПРИРОДЫ

Е. И. Боровкова¹, А. С. Караваев^{1,2}, В. И. Пономаренко^{1,2}, М. Д. Прохоров²

¹Саратовский государственный университет

²Саратовский филиал Института радиотехники и электроники им. В. А. Котельникова РАН

E-mail: rubane@mail.ru



Проводится сопоставление трех известных методов диагностики фазовой синхронизованности по временным реализациям. Сопоставление осуществляется на примере анализа специальным образом подготовленных тестовых данных, воспроизводящих статистику экспериментальных временных реализаций систем регуляции деятельности сердечно-сосудистой системы человека. Показано, что предложенный нами ранее метод диагностики фазовой синхронизованности, основанный на кусочно-линейной аппроксимации мгновенной разности фаз в скользящем окне, демонстрирует лучшую среди сопоставляемых методов чувствительность.

Ключевые слова: фазовая синхронизация, чувствительность, специфичность, временные ряды, ROC-кривая, барорефлекторная регуляция, низкочастотные ритмы.

**Comparison of Methods for Phase
Synchronization Diagnostics from Test Data
Modeling Nonstationary Signals of Biological Nature**

**E. I. Borovkova, A. S. Karavaev,
V. I. Ponomarenko, M. D. Prokhorov**

Three methods of phase synchronization diagnostics from time series are compared by the analysis of test data. These data reproduce the statistics of experimental temporal realizations recorded from the system of human cardiovascular system autonomic control.

Key words: phase synchronization, true positive rate, false positive rate, time series, ROC-curve, autonomic cardiovascular system regulation, low-frequency rhythms.

DOI: 10.18500/1817-3020-2015-15-3-36-42

Введение

Анализ сложных нестационарных сигналов, в частности диагностика синхронного поведения связанных систем, является важной задачей современной нелинейной динамики [1, 2]. Методы анализа динамики фаз демонстрируют высокую чувствительность при анализе сигналов систем различной природы [3]. При этом анализ сигналов сложных систем, подразумевающих нестационарную, хаотическую динамику и стохастичность, требует разработки специальных методов, ориентированных на работу с конкрет-

ными объектами [4]. Важным этапом является изучение возможностей и определение границ применимости таких методов. Одними из наиболее сложных для анализа объектов являются системы биологической природы.

В данной работе проводится сопоставление трех известных методов, зарекомендовавших себя при анализе сложных сигналов: метод, предложенный в работе [5], основанный на анализе распределения разности фаз, метод основанный на оценке дисперсии мгновенной разности фаз, предложенный в работе [6], и метод предложенный нами ранее, продемонстрировавший свою эффективность и значимость для решения задач медицинской диагностики [7–12]. В данной работе предлагается специализированная методика приготовления тестовых данных, воспроизводящих статистику экспериментальных разностей фаз систем регуляции деятельности сердечно-сосудистой системы человека. Нами рассматриваются подсистемы регуляции частоты сердечных сокращений и тонуса артериальных сосудов, имеющие характерную частоту 0.1 Гц и представляющие значительный интерес для исследователей [13–17]. Сопоставление методов осуществляется в ходе анализа таких данных. Выявляются преимущества, недостатки и границы применимости известных и развиваемых подходов диагностики синхронизованности.

Методы

Сопоставляемые методы позволяют диагностировать области фазовой синхронизации между исследуемыми ритмами по зависимости мгновенной разности фаз колебаний исследуемых систем от времени – $\Delta\varphi(t)$.

В работе [5] был предложен метод, основанный на оценке коэффициента фазовой когерентности. На временном интервале длительностью b , оценивается первая Фурье-мода функции плот-



ности распределения вероятностей свернутой разности мгновенных фаз $\Delta\varphi(t) \bmod 2\pi$. Для i -го временного окна рассчитывается коэффициент γ_i . Для двух рядов фаз $\phi_x(t_i)$ и $\phi_y(t_i)$ колебательных процессов X и Y он имеет вид

$$\gamma_i^2 = \left| \left\langle \exp \{i\varphi_{n,m}(t_i)\} \right\rangle_{t_i} \right|, \quad (1)$$

где $\varphi_{n,m}(t_i) = n\phi_x(t_i) - m\phi_y(t_i)$ – (обобщенная) разность фаз, n, m – положительные целые числа, характеризующие порядок фазовой синхронизации, а $\langle \dots \rangle_{t_i}$ означает операцию усреднения по времени.

Коэффициент γ_i достигает значения 1, если сигналы остаются синхронизованными по фазе, и равен 0 при отсутствии синхронизованности. Нестационарность, шумы и другие искажения сигналов приводят к тому, что γ_i принимает промежуточные значения в интервале (0; 1) при анализе экспериментальных данных. При использовании метода для анализа экспериментальных данных полагаем, что участкам фазовой синхронизации соответствуют временные интервалы длительностью не менее l_γ , на которых $\gamma_i > \gamma_0$, где γ_0 – фиксированное пороговое значение. Далее в работе для краткости при упоминании этого метода будем использовать «метод γ ».

Второй метод, использованный в нашей работе, основан на расчете предложенного в статье [6] коэффициента диффузии фазы σ_i , который также рассчитывается в скользящем окне шириной b_σ («метод σ »):

$$\sigma_i = \sqrt{\left\langle \left[\varphi_{n,m}(t_i) - \langle \varphi_{n,m}(t_i) \rangle \right]^2 \right\rangle}. \quad (2)$$

Интервалам фазовой синхронизации соответствуют непрерывные участки длительностью не менее величины l_σ с величиной индекса $\sigma_i > \sigma_0$, где σ_0 – фиксированное пороговое значение.

Ранее нами был предложен и апробирован при анализе сигналов сердечно-сосудистой системы человека метод, основанный на линейной аппроксимации мгновенной разности фаз $\Delta\varphi(t)$ в скользящем окне шириной b_α [7]. В окне осуществляется линейная аппроксимация $\Delta\varphi(t)$ и оценивается угловой коэффициент наклона аппроксимирующей прямой α_i . Фазовая синхронизация диагностируется на интервале длительностью не менее l_α , если выполняется условие $|\alpha_i| \leq |\alpha_0|$, где α_0 – фиксированное пороговое значение («метод α »).

Работа перечисленных методов диагностики фазовой синхронизованности иллюстрируется на рис. 1. В качестве примера на рис. 1, а представлена разность мгновенных фаз колебаний реализации модели барорефлекторной регуляции артериального давления, предложенная в работе [18] и находящаяся под воздействием гармонического сигнала (моделирующего сигнал дыхания по заданному ритму):

$$\varepsilon\dot{x}(t) = x(t) + f(x(t-\tau)) + A \sin(\nu t) + \xi(t), \quad (3)$$

где x – динамическая переменная, имеющая смысл среднего артериального давления, τ – время запаздывания сигнала при его распространении по нервной системе, равное 3.6 с, параметр ε характеризует инерционные свойства сосудов и равен 2 с, A и ν – амплитуда и частота дыхания соответственно, $\xi(t)$ – гауссовский белый шум. Функция f описывает нелинейное преобразование сигнала в ядрах симпатической нервной системы и имеет вид

$$f(x) = \frac{2}{(1 + \exp[-2(x-0.5)])} - \frac{2}{(1 + \exp[2(x-0.5)])}. \quad (4)$$

Частота собственных колебаний системы (3) при $A(t) = 0$ составляет 0.097 Гц. Частота внешнего воздействия $\nu = 0.096$ Гц. В начальный момент времени $A(t) = 0.1$, $t < 100$ с, что соответствует несинхронному режиму. В момент времени $t = 100$ с $A(t)$ скачком меняется: $A(t) = 0.3$, $100 < t < 200$ с, что соответствует режиму синхронизации. Вертикальные пунктирные линии обозначают синхронный участок. В момент времени $t = 200$ с $A(t)$ скачком меняется: $A(t) = 0.1$, $200 < t < 300$ с, что соответствует несинхронному режиму. Результаты применения сопоставляемых методов диагностики синхронизованности в скользящих окнах: γ , σ , α представлены на панелях рис.1, б, в, г. Сплошные вертикальные линии отмечают найденный с помощью каждого из методов интервал синхронизации. Параметры методов были следующими: для метода α $\alpha_i = 0.0002$, для метода γ $\gamma_i = 0.99$, для метода σ $\sigma_i = 0.1$. Для всех алгоритмов параметры ширины скользящего окна $b_\alpha, b_\gamma, b_\sigma$ были равны 20 с. Минимальная протяженность области синхронизации $l_\alpha, l_\gamma, l_\sigma$ ограничивалась значением 10 с. Сдвиг скользящего окна составлял 1 дискретную выборку (0.01 с).

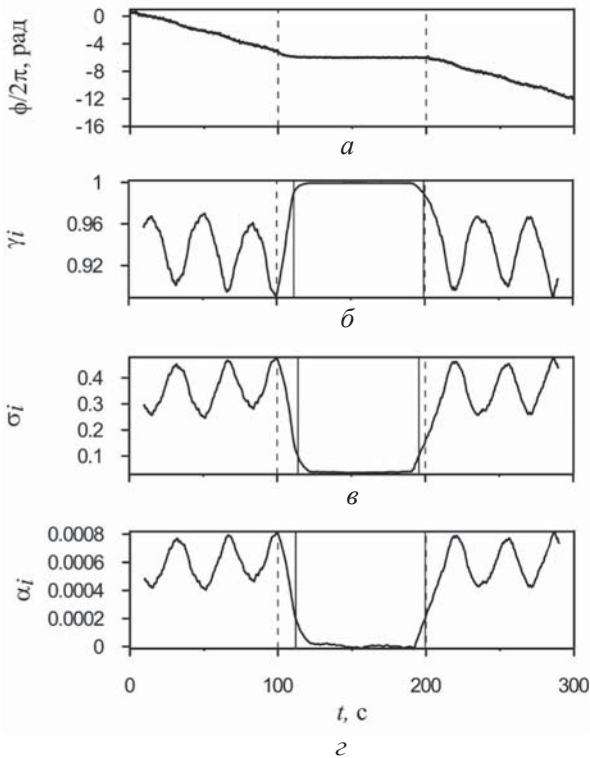


Рис. 1. Диагностика фазовой синхронизованности по обобщенной разности фаз неавтономного автогенератора (3) с собственной частотой 0.097: *a* – мгновенная разность фаз; *б* – результаты работы метода γ , при $\gamma_i = 0.99$; *в* – результаты работы метода σ , при $\sigma_i = 0.1$; *г* – результаты работы метода α , при $\alpha_i = 0.0002$. Параметры $b_\alpha = b_\gamma = b_\sigma = 20$ с, $l_\alpha = l_\gamma = l_\sigma = 10$ с. Сдвиг скользящего окна составлял 1 дискретную выборку (0.01 с). Вертикальный пунктир отмечает моменты изменения связи $A(t)$. Вертикальная сплошная линия отмечает результаты работы методов диагностики участков синхронизации

Статистическая модель

В наших исследованиях мы изучаем фазовую синхронизацию подсистем автономной регуляции частоты сердечных сокращений и сосудистого тонуса сердечно-сосудистой системы, имеющих характерную частоту порядка 0.1 Гц. Для тестирования и настройки методов анализа необходимо разработать методику приготовления тестовых данных, отражающих характерные особенности экспериментальных данных конкретных исследуемых систем.

Нами предложена статистическая модель, позволяющая формировать тестовые временные реализации мгновенных разностей фаз, статистические свойства которых близки к экспериментальным данным, имея при этом априорную информацию о расположении участков синхронизации.

Мы предлагаем формировать тестовые данные, воспроизводя статистику распределений длительности интервалов синхронизации и участков несинхронного поведения в экспериментальных данных. Кроме того воспроизводятся распределения флуктуаций мгновенных частот колебаний исследуемых систем и свойства фазовых шумов. При подборе параметров модели учитываются характерные частоты колебаний.

При построении статистической модели статистика указанных выше параметров оценивалась по двум выборкам экспериментальных данных. Первая группа включала 23 испытуемых без признаков сердечной патологии, вторая группа включала 23 пациента, перенесших инфаркт миокарда (ИМ). Пациенты находились на стационарном лечении в клинике ФГБУ Саратовский НИИ кардиологии Минздрава России, записи делались на третьей неделе после ИМ.

Для каждого испытуемого проводилась одновременная регистрация сигналов электрокардиограммы (ЭКГ) во II стандартном отведении по Эйнтховену и фотоплетизмограммы (ФПГ) с дистальной фаланги безымянного пальца левой руки в состоянии покоя с частотой дискретизации 250 Гц при разрешении 14-битном. Из сигнала ЭКГ выделялся сигнал кардиоинтерваллограммы (КИГ) – последовательность временных интервалов между двумя последовательными R-пиками. Далее синтезировался эквидистантный сигнал КИГ с помощью интерполяции неэквидистантной зависимости кубическими β -сплайнами с частотой дискретизации 5 Гц.

Сигналы КИГ и ФПГ фильтровались полосовым фильтром в полосе частот [0.06, 0.14] Гц для выделения ритмов отражающих активность исследуемых регуляторных систем. Частоты дискретизации выделенного из ФПГ сигнала ограничивались с помощью децимации до 5 Гц.

С помощью преобразования Гильберта выделялись мгновенные фазы колебаний исследуемых регуляторных систем и вычислялась разность фаз. Далее с помощью метода, предложенного в работе [19], определялись границы интервалов фазовой синхронизации и оценивались функции плотности распределения вероятностей (ФПРВ) длительностей синхронных участков (P_H^{ls} для здоровых лиц и P_D^{ls} для больных) (рис. 2, *a*) и несинхронных участков (P_H^{lds} для здоровых лиц и P_D^{lds} для больных) (рис. 2, *б*). Для несинхронных участков оценивались распределения расстройек мгновенных частот колебаний (рис. 2, *в*) для обеих экспериментальных выборок (P_H^{Af} для здоровых лиц и P_D^{Af} для больных).

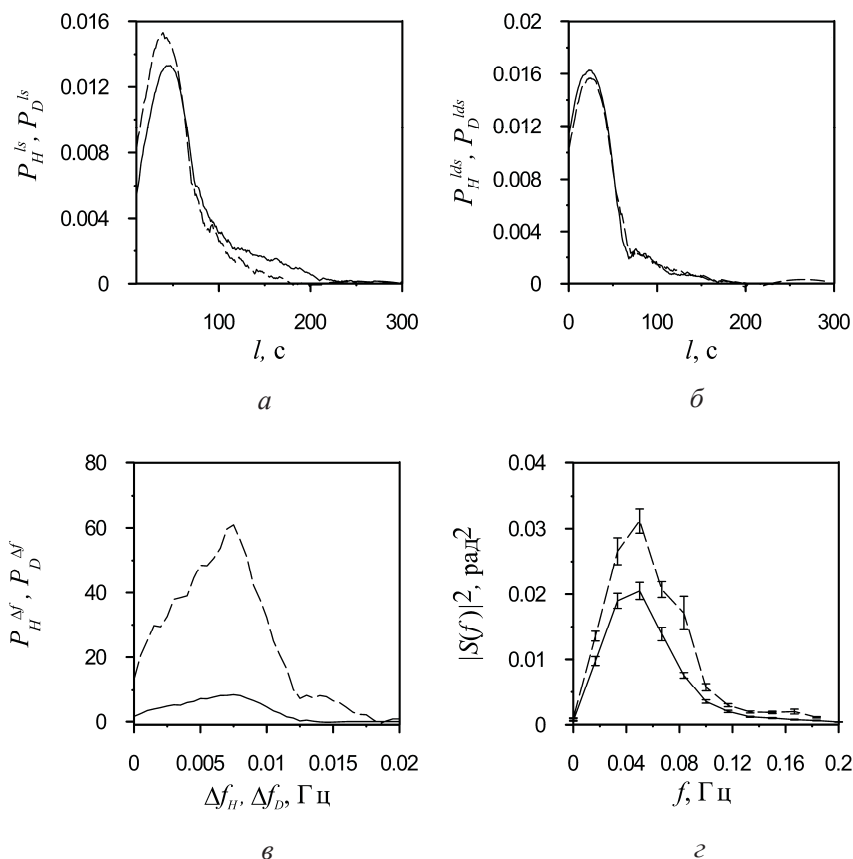


Рис. 2 Функции плотности распределения вероятностей длительностей: *a* – синхронных; *b* – несинхронных участков; *в* – расстройек мгновенных частот колебаний исследуемых систем на несинхронных участках; *г* – усредненные по каждой из выборок Фурье-спектры мощности фазовых шумов экспериментальных выборок. Сплошные линии – статистика, оцененная по выборке здоровых лиц, пунктир – по выборке пациентов, перенесших инфаркт миокарда

ФПРВ экспериментальных данных аппроксимировались с помощью сдвинутых β -распределений: $d \cdot \beta(a, b) + m$ [20]. Наборы параметров, полученные в ходе аппроксимации методом максимального правдоподобия, приведены в таблице.

Параметры β -распределений $d \cdot \beta(a, b) + m$, аппроксимирующие функции плотности распределения вероятности экспериментальных данных

ФПРВ	<i>a</i>	<i>b</i>	<i>d</i>	<i>m</i>
P_H^{ls}	1.00	7.0	348	10.0
P_D^{ls}	1.00	10.0	348	10.0
P_H^{lds}	1.00	9.5	336	0.0
P_D^{lds}	1.00	9.5	336	0.0
P_H^M	1.85	1.16	0.025	-0.003
P_D^M	1.81	1.20	0.024	-0.005

Фазовый шум рассматривался как остатки модели скользящего среднего сигнала $\Delta\varphi(t)$. Для оценки его характеристик из экспериментальных разностей фаз вычитались тренды, аппроксимируемые моделью скользящего среднего с окном длительностью 20 с. Выделенный таким образом фазовый шум имеет нормальное распределение. Дисперсия фазового шума для здоровых лиц составила 0.04 ± 0.01 , для пациентов, перенесших ИМ, 0.07 ± 0.02 (указанны со стандартными отклонениями).

Оцененные и усредненные по каждой из выборок спектральные плотности мощности приведены на рис. 2, *г*.

При генерации тестовых данных с помощью предложенной статистической модели фазовый шум формировался путем фильтрации нормального белого шума фильтром, амплитудно-частотная характеристика которого воспроизводит средний профиль оценок функции плотности



распределения вероятности фазового шума. Для воспроизведения требуемой интенсивности фазового шума полученный сигнал нормировался.

Для иллюстрации работы методики приго-

товления тестовых данных на рис. 3 приведены экспериментальные разности фаз здорового испытуемого (рис. 3, а) и больного (рис. 3, б) с несколькими реализациями тестовых данных.

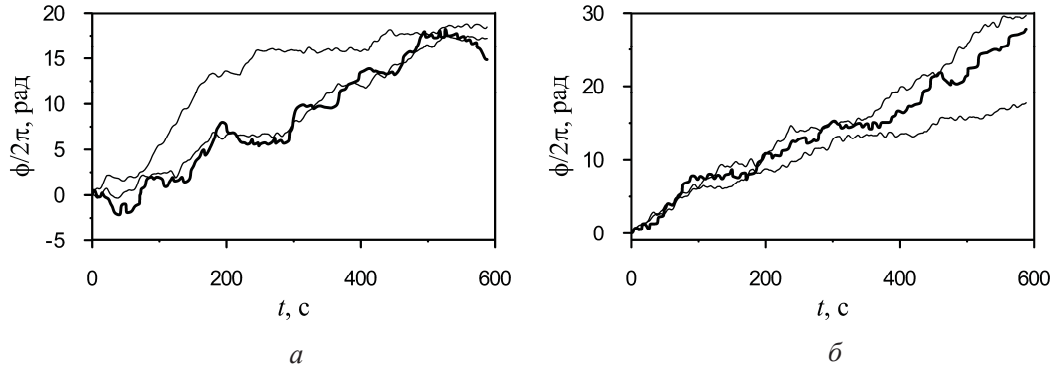


Рис. 3. Экспериментальные разности фаз (толстые линии) и фрагменты модельных разностей фаз (тонкие линии) здорового добровольца (а) и пациента, перенесшего инфаркт миокарда

Сопоставление методов

В ходе сопоставления методов диагностики синхронизованности с помощью предложенной статистической модели генерировались временные реализации тестовых данных, свойства которых соответствовали экспериментальным реализациям здоровых добровольцев и пациентов с ИМ.

Длительность каждой записи составляла 500000 отсчетов, что эквивалентно 100000 с (около 10000 характерных периодов колебаний) при частоте дискретизации 5 Гц.

Выбор параметров методов анализа сложных экспериментальных сигналов является нетривиальной задачей, требующей учета особенностей конкретных исследуемых систем. При этом, как правило, выбор параметров является компромиссом между требованиями к специфичности (FPR) и чувствительности (TPR) методики. Поэтому в ходе сопоставления методов их параметры перебирались в широких диапазонах с оценкой TPR и FPR. В результате анализа с использованием априорной информации о положении участков фазовой синхронизации строились ROC-кривые (receiver operating characteristic), характеризующих соотношение между долей истинно положительных и ложно положительных выводов о наличии участков фазовой синхронизации (рис. 4).

Для построения представленных на рис. 4 иллюстраций параметры методов перебирались в указанных ниже диапазонах. Для метода α : $\alpha_i \in [0; 0.10]$ с шагом 0.001. Значение $\alpha_i = 0$ соответствует горизонтальному участку разности

фаз, $\alpha_i = 0.10$ соответствует росту $\Delta\varphi(t)$ на π радиан за характерный период. Для метода γ : $\gamma_i \in [0.6; 1]$ с шагом 0.004. Значение $\gamma_i = 1$ соответствует δ -пику в распределение разности фаз, $\gamma_i = 0.6$ часто выбирается в качестве эмпирической оценки нижнего порога значения индекса, соответствующего фазовой синхронизации [21]. Для метода σ : $\sigma_i \in [0; 0.35]$ с шагом 0.0035. Значение $\sigma_i = 0$ соответствует горизонтальному участку разности фаз, $\sigma_i = 0.35$ соответствует стандартному отклонению гармонического сигнала с частотой 0.1 Гц и размахом π радиан.

Для всех алгоритмов параметры ширины скользящего окна $b_\alpha, b_\gamma, b_\sigma$ перебирались в диапазоне [1–40 с] с шагом 1 с. Минимальная протяженность области синхронизации $l_\alpha = l_\gamma = l_\sigma = 10$ с. Сдвиг скользящего окна составлял 1 дискретную выборку (0.2 с).

В ходе проведенных исследований было выявлено, что предложенный нами метод α демонстрирует более высокую чувствительность, чем другие сопоставляемые методы. С ростом фазовых шумов чувствительность всех методов снижается. При этом методы γ и σ демонстрируют близкие результаты при небольших шумах, но с ростом уровня шума чувствительность метода γ падает быстрее двух других методов.

Например, при соотношениях TPR/FPR 0.8/0.9 и шуме 50%, а также соотношениях 0.9/0.7 и 0.7/0.8 и шуме 150% оказывается работоспособным только метод α . При соотношении 0.8/0.7 и шуме 150% работают только методы α и γ .

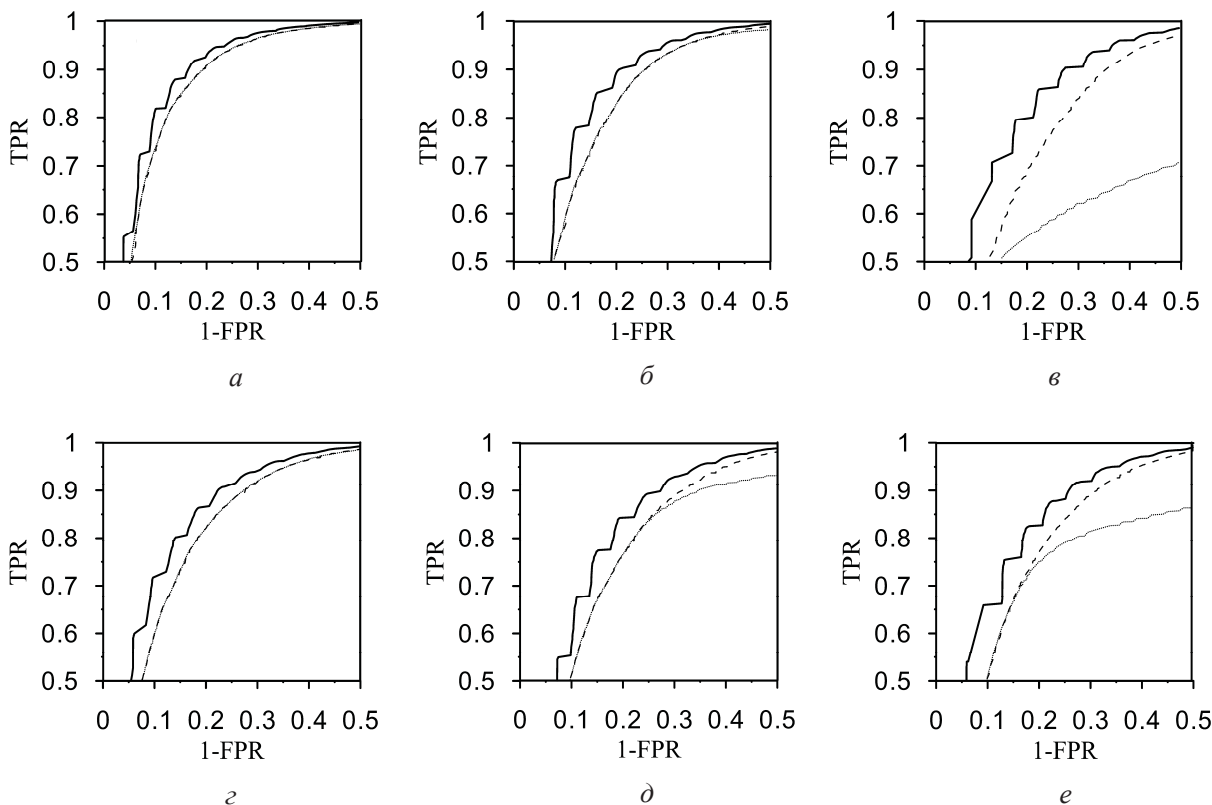


Рис. 4. ROC-кривые, соответствующие параметрам методов, позволяющим получить максимальную чувствительность при минимальной специфичности для 3 значений интенсивности фазового шума: 50% (а, г), 100% (б, д) и 150% (в, е) относительно средней интенсивности шума в экспериментальных данных для модельной разности фаз здоровых добровольцев (а, б, в) и больных пациентов (г, д, е). Пунктирной линией отмечена ROC-кривая для метода γ , тонкой сплошной линией – для метода σ и толстой сплошной линией – для метода α

Чувствительность методов при анализе данных больных (рис. 4, г, д, е) оказывается ниже, чем при анализе записей здоровых лиц (рис. 4 а, б, в). Считаем, что это связано с более высокой интенсивностью фазовых шумов у больных. По-видимому, это обусловлено меньшей интенсивностью сигналов исследуемых регуляторных систем, сниженной вследствие патологии, относительно измерительных и динамических шумов в исходных сигналах.

Заключение

Проведено сравнение трех методов диагностики фазовой синхронизованности по временным реализациям. Задача анализа зашумленных нестационарных данных сложных систем решается на примере исследования подсистем регуляции частоты сердечных сокращений и сосудистого тонуса сердечно-сосудистой системы. Сопоставление методов проведено в ходе анализа подготовленных специальным образом с помощью предложенной статистической модели

тестовых данных, воспроизводящих статистические свойства сигналов исследуемых систем.

В ходе исследования проведен статистический анализ результатов диагностики синхронизованности. При этом параметры методов перебирались в широком диапазоне при анализе тестовых данных, воспроизводящих статистику экспериментальных выборок здоровых лиц и больных, перенесших ИМ. Работоспособность методов исследована при разных уровнях шумов.

Показано, что метод, предложенный нами в работе [7] и основанный на кусочно-линейной аппроксимации мгновенной разности фаз, демонстрирует более высокую чувствительность, чем другие сопоставляемые.

При этом другие методы, основанные на расчете индексов γ и σ , демонстрируют близкие результаты при небольших шумах, а с ростом уровня шума чувствительность методики, основанной на расчете γ , снижается быстрее двух других методов.



Показано, что чувствительность всех сопоставляемых методов оказывается ниже при анализе данных пациентов, перенесших ИМ, по сравнению со здоровыми лицами, что связано с более высоким уровнем фазовых шумов в записях больных.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФ (проект № 14-12-00291 «Разработка статистической модели данных и сопоставление методов») и гранта Президента РФ (МК-2267.2014.8 «Выбор параметров методов диагностики синхронизованности»).

Список литературы

1. *Pikovsky A., Rosenblum M., Kurths J.* Synchronization : A universal concept in nonlinear sciences. Cambridge : Cambridge University Press, 2001. 411 с.
2. *Блехман И. И.* Синхронизация динамических систем. М. : Наука, 1971.
3. *Безручко Б. П., Смирнов Д. А.* Математическое моделирование и хаотические временные ряды. Саратов : ГосУНЦ «Колледж», 2005. 299 с.
4. *Bezruchko B. P., Smirnov D. A.* Extracting Knowledge From Time Series (an Introduction to Nonlinear Empirical Modeling) // Springer, Springer Series in Synergetics. 2010. P. 405.
5. *Tallon-Baudry C., Bertrand O., Fischer C.* Oscillatory synchrony between human extrastriate areas during visual short-term memory maintenance // *J. Neuroscience*. Vol. 21. 2001. P. 1–5.
6. *Ying-Cheng Lai, Mark G. Frei, Ivan Osorio.* Detecting and characterizing phase synchronization in nonstationary dynamical systems // *Physical rev. E*. Vol. 73. 2006. P. 026214.
7. *Karavaev A. S., Prokhorov M. D., Ponomarenko V. I., Kiselev A. R., Gridnev V. I., Ruban E. I., Bezruchko B. P.* Synchronization of low-frequency oscillations in the human cardiovascular system // *Chaos*. Vol. 19. 2009. P. 033112.
8. *Киселев А. Р., Беспятов А. Б., Посненкова О. М., Гриднев В. И., Пономаренко В. И., Прохоров М. Д., Довгалецкий П. Я.* Внутренняя синхронизация основных 0.1 Гц-частотных ритмов в системе вегетативного управления сердечно-сосудистой системой // *Физиология человека*. 2007. Т. 33, № 2. С. 69–75.
9. *Kiselev A. R., Gridnev V. I., Prokhorov M. D., Karavaev A. S., Posnenkova O. M., Ponomarenko V. I., Bezruchko B. P.* Effects of antihypertensive treatment on cardiovascular autonomic control : a prospective study // *The Anatolyan J. of Cardiology*. 2014. Vol. 14, № 8. P. 701–710.
10. *Безручко Б. П., Гриднев В. И., Караваяев 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 // *Изв. вузов. ПНД*. 2009. Т. 17, № 6. С. 44–56.
11. *Kiselev A. R., Gridnev V. I., Prokhorov M. D., Karavaev A. S., Posnenkova O. M., Ponomarenko V. I., Bezruchko B. P., Shvartz V. A.* Evaluation of 5-year risk of cardiovascular events in patients after acute myocardial infarction using synchronization of 0.1-Hz rhythms in cardiovascular system // *Annals of Noninvasive Electrocardiology*. 2012. Vol. 17. P. 204–213.
12. *Киселев А. Р., Беспятов А. Б., Колижирина О. М., Гриднев В. И., Пономаренко В. И., Прохоров М. Д., Довгалецкий П. Я.* Внутренняя синхронизация основных 0.1 Гц-частотных ритмов в системе вегетативного управления сердечно-сосудистой системой // *Физиология человека*. 2007. Т. 33, № 2. С. 69–75.
13. *Burgess D. E., Hundley J. C., Brown D. R., Li S.-G., Randal D. C.* First-order differential-delay equation for the baroreflex predicts the 0.4-Hz blood pressure rhythm in rats // *Amer. J. of Physiology. Reg. Int. and Comp. Phys.* 1997. Vol. 273. P. 1878–1884.
14. *Ringwood J. V., Malpas S. C.* Slow oscillations in blood pressure via a nonlinear feedback model // *Amer. J. of Physiology – Regulatory, Integrative and Comparative Physiology*. 2001. Vol. 280. P. 1105.2.
15. *Ottensen J. T.* Modelling the dynamical baroreflex-feedback control // *Mathematical and Computer Modelling*. 2000. Vol. 31. P. 167.
16. *Флейшман А. Н.* Медленные колебания гемодинамики. Теория, практическое применение в клинической медицине. Новосибирск : Наука, 1999. 543 с.
17. *Баевский Р. М., Иванов Г. Г., Чирейкин Л. В., Гаврилушкин А. П., Довгалецкий П. Я., Кукушкин Ю. А., Миронов Т. Ф., Прилуцкий Д. А., Семенов А. В., Федоров В. Ф., Флейшман А. Н., Медведев М. М.* Анализ variability сердечного ритма при использовании различных электрокардиографических систем (методические рекомендации) // *Вестн. аритмологии*. 2001. Т. 24. С. 66–85.
18. *Malpas S. C.* Neural influences on cardiovascular variability : possibilities and pitfalls // *Amer. J. of Physiology Heart Circ Physiol*. 2002. № 282(1). P. 6.
19. *Prokhorov M. D., Ponomarenko V. I., Gridnev V. I., Vodrov M. B., Bespyatov A. B.* Synchronization between main rhythmic processes in the human cardiovascular system // *Phys. Rev. E*. 2003. Vol. 68. P. 041913.
20. *Айвазян С. А., Енюков И. С., Мешалкин Л. Д.* Прикладная статистика : Основы моделирования и первичная обработка данных. Справочное изд. М. : Финансы и статистика, 1983. 471 с.
21. *Tass P., Smirnov D. A., Karavaev A. S., Barnikol U., Barnikol T., Adamchic I., Hauptmann C., Pawelczyk N., Maarouf M., Sturm V., Freund H. -J., Bezruchko B. P.* The causal relationship between subcortical local field potential oscillations and parkinsonian resting tremor // *J. Neural Eng.* 2010. Vol. 7. P. 016009.



УДК 537.86/87:530.182

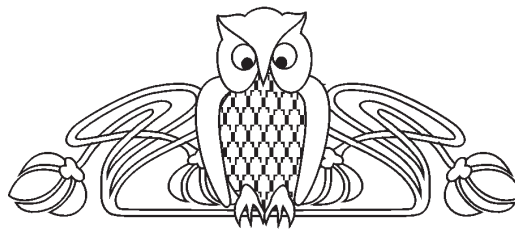
УПРАВЛЕНИЕ КОГЕРЕНТНЫМ РЕЗОНАНСОМ С ПОМОЩЬЮ ЗАПАЗДЫВАЮЩЕЙ ОБРАТНОЙ СВЯЗИ. НАТУРНЫЙ ЭКСПЕРИМЕНТ

В. В. Семенов¹, Т. Е. Вадивасова¹, Э. Шёлль², А. С. Захарова²

¹Саратовский государственный университет

²Берлинский Технический Университет (Германия)

E-mail: vadvivasovate@yandex.ru



В работе экспериментально показана возможность управления поведением динамических систем, находящихся в режиме когерентного резонанса с помощью запаздывающей обратной связи. Данный вопрос рассматривается на примере осциллятора ФитцХью – Нагумо, служащего классической моделью возбудимой системы, а также на примере генератора Ван дер Поля с жестким возбуждением, который также демонстрирует режим когерентного резонанса. В обоих случаях при вариации времени запаздывания запаздывающая обратная связь может как усиливать, так и подавлять эффект когерентного резонанса.

Ключевые слова: стохастический осциллятор, шум, генератор с жестким возбуждением, когерентный резонанс, запаздывающая обратная связь, стохастическая бифуркация.

Time-delayed Feedback Control of Coherence Resonance. Experimental Study

V. V. Semenov, T. E. Vadviasova,
E. Schöll, A. S. Zakharova

In the paper a possibility to control the behavior of dynamic systems under conditions of coherent resonance using delayed feedback is proved experimentally. This problem is studied on the classical example of excitable system, which is the FitzHugh – Nagumo oscillator, as well as on the example of the Van der Pol oscillator with hard excitation, which also demonstrates the regime of coherent resonance. In both cases, when changing the delay time the feedback loop can both enhance and suppress the effect of coherent resonance.

Key words: stochastic oscillator, noise, self-sustained oscillator with the hard excitation, coherent resonance, time-delayed feedback, stochastic bifurcation.

DOI: 10.18500/1817-3020-2015-15-3-43-51

Введение

Явление когерентного резонанса (КР) первоначально было обнаружено в возбудимых системах [1–4]. Данное явление заключается в существовании оптимального уровня шума, при котором индуцированные шумом колебания становятся наиболее близкими к регулярным. Различают возбудимые системы I и II типа. Для систем I типа возбудимый режим связан с существованием нелокальной седло-узловой бифуркации точек равновесия, в результате

которой из сепаратрисного контура рождается предельный цикл (это так называемая SNIPER-бифуркация от слов saddlenode-infinite-period bifurcation). Рождению предельного цикла предшествует возбудимый режим, связанный с существованием сепаратрисного контура, обеспечивающего возврат траектории в устойчивую точку равновесия. В случае возбудимости II типа сепаратрисный контур отсутствует, а возврат в устойчивую точку равновесия из состояния возбуждения обеспечивается существованием в фазовом пространстве некоторой петли, образованной линиями быстрых и медленных движений. Классическим примером возбудимой системы II типа может служить осциллятор ФицХью – Нагумо [5, 6].

В последние годы когерентный резонанс был установлен также в автогенераторах с бифуркацией Андронова – Хопфа [7–10]. При этом «настоящий» эффект КР, состоящий в абсолютном уменьшении ширины спектральной линии и увеличении времени корреляции, наблюдается в автогенераторах с субкритической бифуркацией Андронова – Хопфа, в то время как в окрестности суперкритической бифуркации возможно получить только относительное уменьшение ширины спектра [7]. Когерентный резонанс в генераторах с субкритической бифуркацией Андронова – Хопфа (в генераторах с жестким возбуждением) исследовался численно и с применением приближенных аналитических методов [7, 8, 10], а также экспериментально на аналоговой модели генератора [9, 10]. КР наблюдается не только в области бистабильности, где система имеет два аттрактора: предельный цикл и устойчивую точку равновесия, но и в подпороговом режиме, у границы касательной бифуркации рождения устойчивого и неустойчивого циклов, где колебания в детерминированной системе не возникают. Генератор с жестким возбуждением иногда рассматривают как особый случай возбудимой



системы (см., например, [11]). Однако, на наш взгляд, такой подход не оправдан. Действительно, для возбудимых систем как I, так и II типа выброшенная за порог возбуждения траектория движется по заданной петле и время релаксации к точке равновесия слабо зависит от шума. В генераторе в подпороговом режиме подобная петля отсутствует. При этом время возврата стохастической траектории в окрестность состояния равновесия является полностью случайным и характеризуется широким разбросом возможных значений. Механизмы КР в возбудимых осцилляторах и в генераторе с жестким возбуждением также несколько различаются [8, 10].

Индукцированные шумом колебания в условиях КР обладают определенными чертами автоколебательного режима. Так, для них было установлено явление вынужденной и взаимной синхронизации [12–15], причем было показано, что синхронизация стохастических колебаний происходит по тому же сценарию, что и частотно-фазовая синхронизация в детерминированных автоколебательных системах.

В последнее время актуальной стала проблема управления динамическими системами, в том числе системами, содержащими источники шума и демонстрирующими различные стохастические эффекты. Одной из задач в этом направлении является задача управления эффектом КР с целью получения максимально регулярного поведения системы при оптимальном шумовом воздействии. Известно, что когерентный резонанс в возбудимых системах как I, так и II типа может контролироваться с помощью запаздывающей обратной связи (ЗОС) [16–19]. Аналогичное влияние ЗОС было установлено и для КР в модели Стюарта – Ландау с субкритической бифуркацией Андронова – Хопфа [11, 20]. В отмеченных исследованиях используются теоретические методы анализа и численное моделирование. При этом на сегодняшний день практически отсутствуют работы, в которых бы данная задача рассматривалась средствами натурального эксперимента. Исключение составляет экспериментальное исследование влияния ЗОС на степень регулярности индуцированных шумом колебаний в гальваническом элементе [21] и работа [22], где возможность управления характеристиками КР изучается с применением аналоговой модели генератора с жестким возбуждением. В то же время экспериментальные методы очень важны в задачах с шумом, поскольку теоретический анализ нелинейных стохастических систем в большинстве случаев является приближенным, а используемые при численном моделировании разностные схемы интегрирования стохастических уравнений обладают слабой сходимостью и при сильном шуме могут приводить к нереальным результатам.

В данной работе ставилась цель экспериментально изучить возможность управления характеристиками КР при наличии запаздывающей обратной связи как в возбудимых системах (на примере осциллятора ФитцХью – Нагумо), так и в невозбудимых системах (на примере генератора Ван дер Поля с субкритической бифуркацией Андронова – Хопфа), а также выявить общие черты и принципиальные различия в наблюдаемых эффектах для двух указанных типов систем.

1. Управление когерентным резонансом в осцилляторе ФитцХью – Нагумо

Осциллятор ФитцХью – Нагумо является упрощенной моделью нейрона [23, 24] и широко используется в нелинейной динамике и биофизике в качестве простейшего примера возбудимой системы. Помимо возбудимого режима, осциллятор ФитцХью – Нагумо в зависимости от значений параметров, может находиться в бистабильном режиме с двумя устойчивыми точками равновесия или демонстрировать автоколебания. Уравнения осциллятора могут быть записаны в виде

$$\varepsilon \frac{dx}{dt} = x - \frac{1}{3}x^3 - y, \quad \frac{dy}{dt} = x + a + \eta(t), \quad (1)$$

где $x = x(t)$, $y = y(t)$ – безразмерные вещественные динамические переменные, t – безразмерное время, a , ε – параметры системы. Во второе уравнение добавлен аддитивный гауссов шум $\eta(t)$. В случае белого шума можно представить $\eta(t) = \sqrt{2D}n(t)$, где $n(t)$ – нормированный источник гауссова белого шума ($\langle n(t) \rangle \equiv 0$, $\langle n(t)n(t+\tau) \rangle = \delta(\tau)$, скобки $\langle \dots \rangle$ означают статистическое усреднение, $\delta(\dots)$ – функция Дирака), D – константа, задающая интенсивность белого шума. В случае цветного низкочастотного шума случайный процесс $\eta(t)$ может быть задан как процесс Орнштейна – Уленбека: $\tau_c \frac{d\eta}{dt} = -\eta + \sqrt{2D\tau_c}n(t)$, где τ_c – параметр, определяющий время корреляции цветного шума $\eta(t)$. Дисперсия процесса $\eta(t)$ равна единице. Возбудимый режим наблюдается в области единственной устойчивой точки равновесия вблизи линии бифуркации Андронова – Хопфа при условии малости параметра ε . Именно в



этом случае осциллятор (1) при воздействии шума демонстрирует широко известный эффект когерентного резонанса [1, 2].

Управление когерентным резонансом в осцилляторе ФитцХью – Нагумо исследовалось численно в работах [18, 19] (соответственно при белом и цветном шуме). В качестве модели рассматривался осциллятор (1), дополненный запаздывающей обратной связью:

$$\varepsilon \frac{dx}{dt} = x - \frac{1}{3}x^3 - y,$$

$$\frac{dy}{dt} = x + a + \eta(t) + K[y(t - \tau) - y(t)], \quad (2)$$

где K – коэффициент ЗОС, τ – время запаздывания. Однако представленные в статьях результаты численного моделирования не были воспроизведены в натурных экспериментах.

В настоящей работе было проведено экспериментальное исследование влияния дополнительной цепи ЗОС на эффект КР в возбудимом осцилляторе ФитцХью – Нагумо и экспериментально оценены возможности управления характеристиками стохастических колебаний в режиме КР с помощью вариации параметров ЗОС. Результаты экспериментов сопоставляются с данными, представленными в [18, 19].

Для проведения экспериментов была создана экспериментальная установка, представляющая собой аналоговую модель осциллятора ФитцХью – Нагумо. Схема аналоговой модели представлена на рис. 1. Также было создано электронное устройство, реализующее запаздывающую обратную связь. Данная реализация ЗОС была спроектирована на базе микроконтроллера ATMEGA16. Схема представлена на рис. 2.

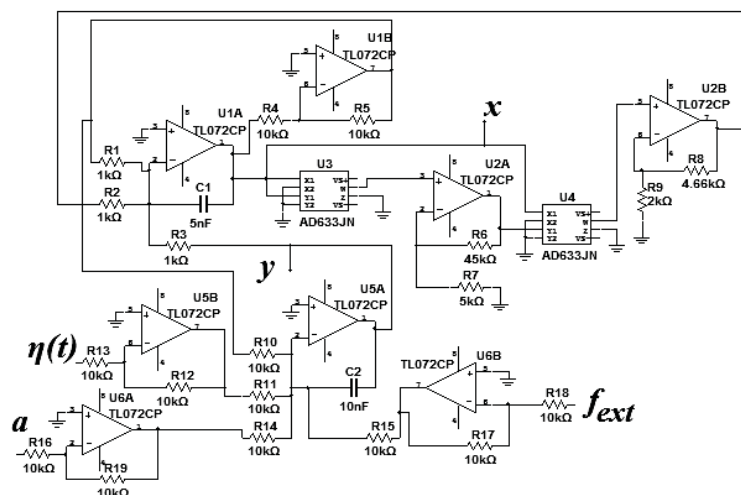


Рис. 1. Схема экспериментальной установки (аналоговая модель осциллятора ФитцХью – Нагумо с дополнительной цепочкой ЗОС)

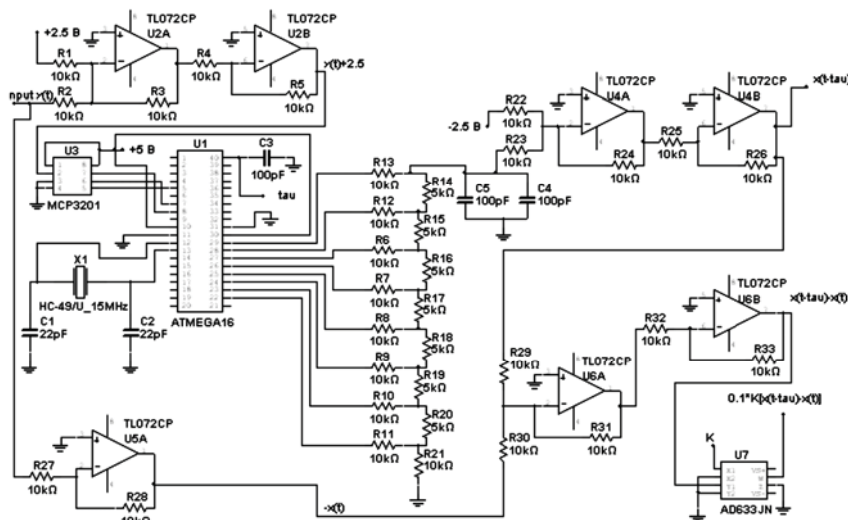


Рис. 2. Схема запаздывающей обратной связи



Работа экспериментальной установки при наличии запаздывающей обратной связи описывается уравнениями в физических переменных, аналогичными уравнениям (2):

$$R_0 C \varepsilon \dot{x} = x - \frac{x^3}{3} - y,$$

$$R_0 C \dot{y} = x + a + \eta(t) + K[y(t - \tau) - y(t)],$$

$$R_0 C \tau_c \dot{\eta} = -\eta + \sqrt{2D\tau_c} n(t). \quad (3)$$

Здесь x и y – напряжения, снимаемые с соответствующих выходов установки. Параметры схемы подбирались таким образом, чтобы обеспечить количественное совпадение безразмерных переменных в (2) и соответствующих величин в (3). Величины $R_0=10$ кОм, $C=10$ нФ определяли масштаб времени в реальном эксперименте. Случайное слагаемое $\eta(t)$, входящее во второе уравнение системы (3), описывает цветной шум с временем корреляции τ_c и единичной дисперсией. Оно формировалось с помощью преобразования сигнала $\xi(t)$, создаваемого генератором шума Г2-59. Напряжение на выходе генератора имеет распределение, близкое к гауссову, а его спектральная плотность практически постоянна в полосе частот 0–100кГц. В этом частотном диапазоне можно считать, что $\xi(t) = \sqrt{2Dn(t)}$, где D – безразмерная величина, характеризующая интенсивность шумового сигнала, $n(t)$ – нормированный источник шумового напряжения со спектральной плотностью 1 В²с.

Величина D определяется спектральной плотностью шумового напряжения, подаваемого на схему, и её можно регулировать в эксперименте.

В ходе экспериментов со схемы снимался сигнал $x(t)$, который оцифровывался с помощью АЦП. Шаг по времени при получении данных составлял $\Delta t = 2 \cdot 10^{-5}$, шаг квантования сигнала – $\Delta x = 2 \cdot 10^{-3}$ В. Данные поступали на компьютер и подвергались статистической обработке. Рассчитывались такие статистические характеристики колебаний, как время корреляции t_{cor} и нормированная девиация интерспайкового интервала R_T .

Корреляционная функция стохастических колебаний $x(t)$ рассчитывалась по временному ряду данных в предположении эргодичности и стационарности. Соответственно усреднение по ансамблю реализаций заменялось усреднением по времени:

$$\psi_x(\theta) = \langle x(t)x(t + \theta) \rangle - \langle x(t) \rangle^2. \quad (4)$$

Время корреляции определялось в виде

$$t_{cor} = \frac{1}{\psi_x(0)} \int_0^\infty |\psi_x(\theta)| d\theta. \quad (5)$$

Термин «интерспайковый интервал» пришел из биофизики и означает время между последовательными состояниями возбуждения (спайками). Он рассчитывался как время T_i между последовательными (j -м и $j+1$ -м) достижениями переменной $x(t)$ некоторого заданного уровня x_m при одном и том же знаке производной $\dot{x}(t)$. При расчетах полагалось $x_m = 2$, $\dot{x}(t) > 0$. Нормированная девиация интерспайкового интервала R_T определяется следующим образом:

$$R = \frac{\sqrt{\langle T_i^2 \rangle - \langle T_i \rangle^2}}{\langle T_i \rangle}. \quad (6)$$

В первую очередь рассмотрим влияние характеристик шума на эффект когерентного резонанса в системе (3) при отсутствии запаздывания. Для этого положим время запаздывания $\tau = 0$, интенсивность шума $D = 0.0625$, параметры $\varepsilon = 0.01$, $a = 1.05$ В и пронаблюдаем за эволюцией времени корреляции t_{cor} и девиации R_T . На рис. 3 приведена экспериментально полученная зависимость времени корреляции стохастических колебаний t_{cor} от времени корреляции шума τ_c . При значении времени корреляции шума $\tau_c = 0.05$ с наблюдается единственный максимум времени корреляции колебаний, т.е. имеет место эффект КР.

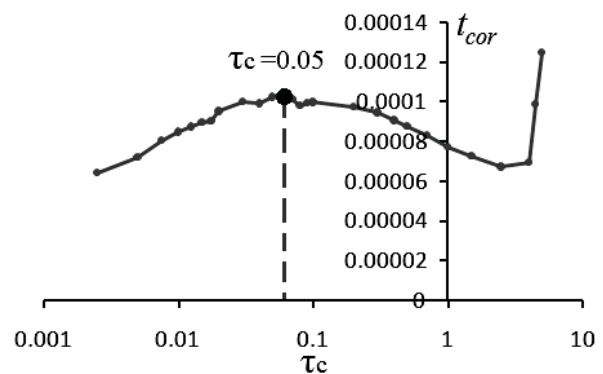


Рис. 3. Зависимость времени корреляции колебаний в системе (3) от времени корреляции шума при отсутствии сигнала ЗОС. Здесь и далее все переменные, имеющие размерность времени, приводятся в секундах

График зависимости нормированной девиации R_T от τ_c приведен на рис. 4. При $\tau_c = 0.05$ с ± 0.005 с величина R_T достигает минимума, что свидетельствует о наибольшей степени упорядоченности колебаний в этом случае.

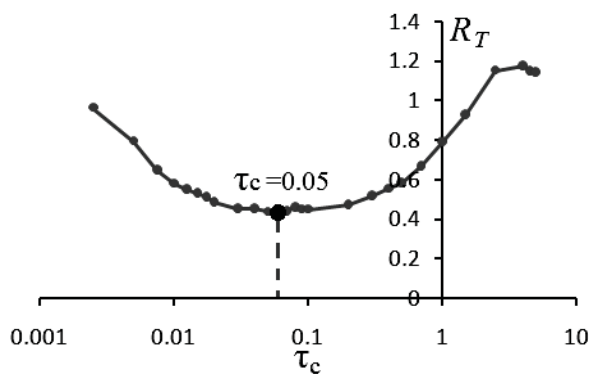


Рис. 4. Зависимость нормированной девиации интерспайковых интервалов в осцилляторе (3) от времени корреляции шума при отсутствии сигнала ЗОС

Полученные экспериментальные результаты свидетельствуют о существовании оптимального значения времени корреляции цветного шума τ_c при постоянной дисперсии $\langle \eta^2(t) \rangle = 1B^2$. Для данного значения τ_c стохастические колебания наиболее когерентны. Экспериментально полученные зависимости, представленные на рис. 2 и рис. 3, полностью согласуются с численными результатами, приведенными в [19].

Теперь исследуем возможности управления характеристиками колебаний с помощью сигнала ЗОС. Будем менять время запаздывания в режиме наиболее когерентных колебаний и наблюдаем за изменением времени корреляции t_{cor} . Полученная зависимость t_{cor} от времени запаздывания представлена на рис. 5.

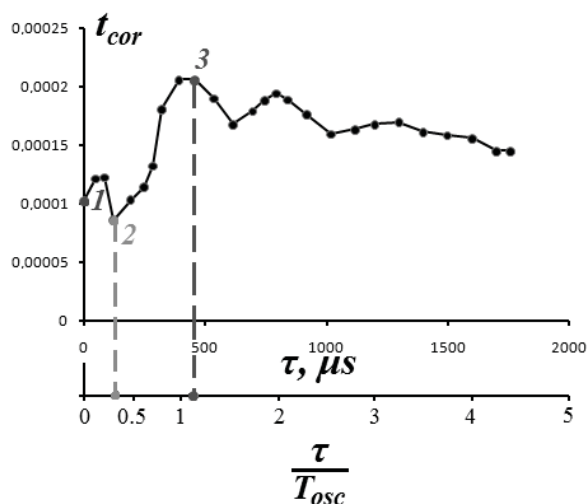


Рис. 5. Зависимость времени корреляции колебаний возбудимого осциллятора (3) от абсолютного и приведенного времени запаздывания в цепочке ЗОС при $\tau_c = 0.05$ с, $K = 0.5$. Здесь $T_{osc} = \langle T_i \rangle$ – среднее время стохастических колебаний

Зависимость носит немонотонный характер. Можно четко различить, по крайней мере, три максимума времени корреляции колебаний. Точки 1, 2, 3 на графике отмечают соответственно значение времени корреляции, полученное для осциллятора без ЗОС в оптимальном режиме, значение главного минимума и значение главного максимума. При этом почти при любом времени запаздывания, кроме окрестности точки 2, значение t_{cor} больше, чем в точке 1 (отсутствие ЗОС).

Таким образом, экспериментально был подтвержден результат, обнаруженный при численном моделировании осциллятора Фиц-Хью – Нагумо с цветным шумом и запаздывающей обратной связью [19]. Степенью когерентности индуцированных шумом стохастических колебаний возбудимого осциллятора можно управлять с помощью запаздывающей обратной связи, меняя время запаздывания. По-видимому, спектральные характеристики шумового воздействия в данном случае не играют принципиальной роли. Качественно аналогичный эффект ранее был получен численно и для белого шума [18]. Данные, приведенные в [18], позволяют связать механизм управления характеристиками когерентного резонанса с влиянием параметров ЗОС на собственные значения устойчивой точки равновесия в осцилляторе без шума. Как показали расчеты, приведенные в [18], максимумы времени корреляции индуцированных шумом колебаний совпадают с минимумами модуля вещественной части старшего (наименьшего по модулю) собственного значения устойчивого равновесия в осцилляторе без шума.

2. Управление когерентным резонансом в генераторе с жестким возбуждением

Моделью для исследования эффекта КР в генераторе с жестким возбуждением может служить автоколебательная система типа осциллятора Ван дер Поля с дополнительной ЗОС, задаваемая следующим уравнением в безразмерных переменных:

$$\frac{d^2x}{dt^2} - [\varepsilon + \mu x^2 - x^4] \frac{dx}{dt} + \omega_0^2 x = \sqrt{2D}n(t) + K(x(t-\tau) - x(t)). \quad (7)$$

Здесь ε , μ – параметры, определяющие режим генератора, ω_0 – параметр, задающий основную частоту автоколебаний, $n(t)$ – нормированный



источник гауссова белого шума, D – интенсивность шума. Параметры K и τ , как и в модели (2), определяют коэффициент ЗОС и время запаздывания. Данная модель является более «реалистичной», чем гармонический автогене-

ратор Стюарта – Ландау, рассмотренный в [20].

Для проведения натурных экспериментов была создана экспериментальная установка, представляющая собой аналоговую модель генератора (7) (рис. 6).

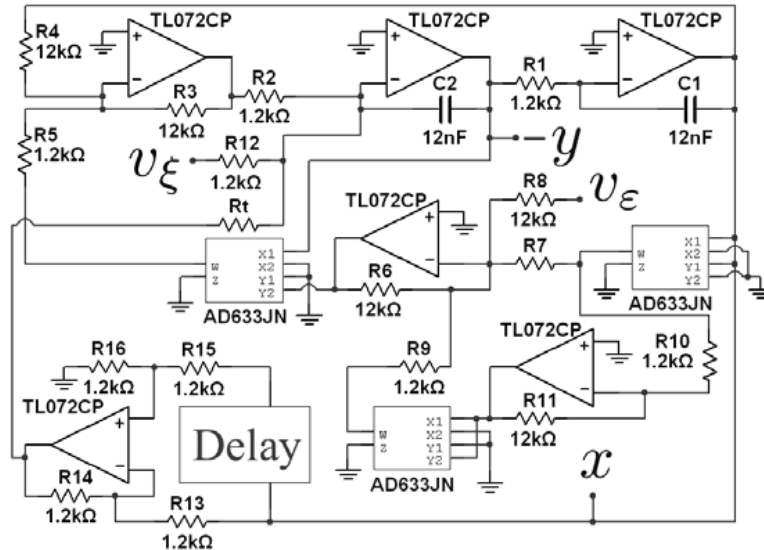


Рис. 6. Схема экспериментальной установки (аналоговая модель генератора Ван дер Поля с жестким возбуждением (7))

Работа установки описывается уравнением

$$\frac{d^2v}{dt^2} - \frac{1}{RC} \left[v_\varepsilon + \frac{R}{R_7} v^2 - v^4 \right] \frac{dv}{dt} + \frac{1}{(RC)^2} v = \frac{1}{(RC)^2} v_\xi + \frac{R}{R_\tau (RC)^2} (v_\tau - v) \quad (8)$$

где v – напряжение в точке x на схеме, приведенной на рис. 6, v_ε – случайный сигнал от генератора Agilent 33250A. Шумовое напряжение v_ξ имеет распределение, близкое к гауссову, и широкий спектр. Таким образом, можно положить $v_\xi = \sqrt{2D}n(t)$, где D – безразмерная величина, характеризующая интенсивность шумового сигнала, $n(t)$ – нормированный источник шумового напряжения со спектральной плотностью $1 \text{ В}^2\text{с}$. Значения сопротивлений на схеме $R_1 = R_2 = R_5 = R_9 = R_{10} = R_{12} = R_{13} = R_{14} = R_{15} = R_{16} \equiv R$, $R_3 = R_4 = R_6 = R_8 = R_{11} = 10R$ и $C_1 = C_2 \equiv C$. В такой форме при переходе к безразмерному времени $t/(RC)^2 \rightarrow t$ и переобозначении параметров $\varepsilon = v_\varepsilon$, $\mu = R/R_7$, $K = R/R_\tau$ система (8) может быть сведена к уравнению математической модели (7). Несмотря на соответствие между уравнением (8), описывающим экспериментальную установку, и (7), полученные в эксперименте бифуркационные значения параметров несколько отличаются от найденных численно для (7). Это связано с тем, что при выведении уравне-

ния (8) использовалась стандартная аппроксимация сигналов операционных усилителей, которая обычно применяется в радиоэлектронике, но не вполне соответствует реальности. Однако наша главная цель состоит в экспериментальном подтверждении качественных сторон явлений, в то время как количественные различия в данном исследовании не являются принципиальными.

Были проведены исследования влияния ЗОС на эффект КР в аналоговой модели генератора (8) в подпороговом режиме при $\mu = 0.5$, $\varepsilon = -0.095\text{В}$, $\omega_0 = 1$, $D = 0.01$. Экспериментальные результаты сопоставлялись с данными численного исследования модели (7). Полученные результаты свидетельствуют о существенном влиянии времени запаздывания τ на степень когерентности индуцированных шумом колебаний. На рис. 7 приведены результаты экспериментальных измерений в модели (8) и соответствующих вычислений, проведенных для системы (7). Численные и экспериментальные результаты находятся в полном соответствии. Они свидетельствуют о



немонотонном характере зависимости времени корреляции t_{cor} колебаний от времени запаздывания цепи ЗОС. Можно наблюдать последовательность максимумов и минимумов величины t_{cor} , причем по сравнению со временем корреляции при отсутствии ЗОС, значения, соответствующие минимумам оказываются меньше, а значения в максимумах существенно больше. Максимумы соответствуют интервалам запаздывания $\tau = \left(\frac{3}{4} + n\right)T$, $n = 0, 1, 2, \dots$, минимумы наблюда-

ются при $\tau = \left(\frac{1}{4} + n\right)T$, для $\tau = \frac{n}{2}T$ значения времени корреляции практически повторяются. Здесь T означает средний период колебаний.

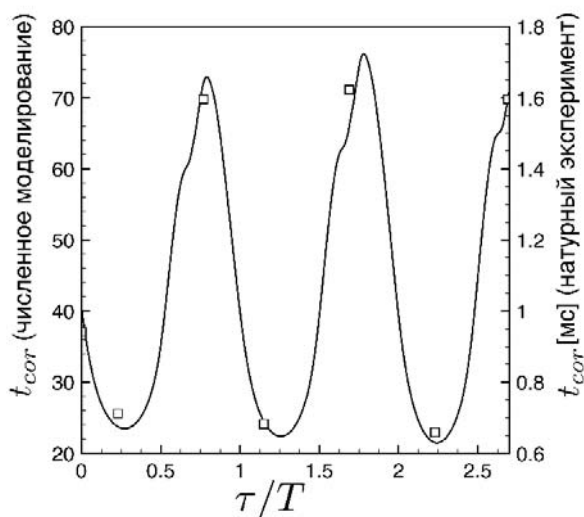


Рис. 7. Зависимость времени корреляции колебаний $x(t)$ от времени нормированного запаздывания. Квадратами отмечены результаты экспериментальных измерений, полученные для аналоговой модели (8), сплошная линия соответствует результатам численных расчетов, проведенных для системы (7) при значениях параметров, соответствующих эксперименту и $D = 0.003$

Следует отметить, что ранее похожие результаты, касающиеся управления когерентным резонансом с помощью ЗОС, были получены численно для квазигармонической модели генератора с жестким возбуждением (осциллятор Стюарта – Ландау с субкритической бифуркацией, иначе называемый комплексной формой осциллятора Хопфа) [20]. В полученной зависимости времени корреляции t_{cor} от времени запаздывания максимумы соответствовали целому числу периодов колебаний, а минимумы – целому числу полупериодов. Различие с представленными в данной работе результатами

связано с несколько иным характером ЗОС в модели, исследованной в [20], и в модели (7), (8).

Рассмотрим, каков бифуркационный механизм влияния ЗОС на стохастический резонанс в генераторе с жестким возбуждением. На рис. 8 приведены бифуркационные значения параметра ϵ , соответствующие касательной бифуркации циклов и субкритической бифуркации Андронова – Хопфа в детерминированном генераторе с цепочкой ЗОС при различных значениях времени запаздывания.

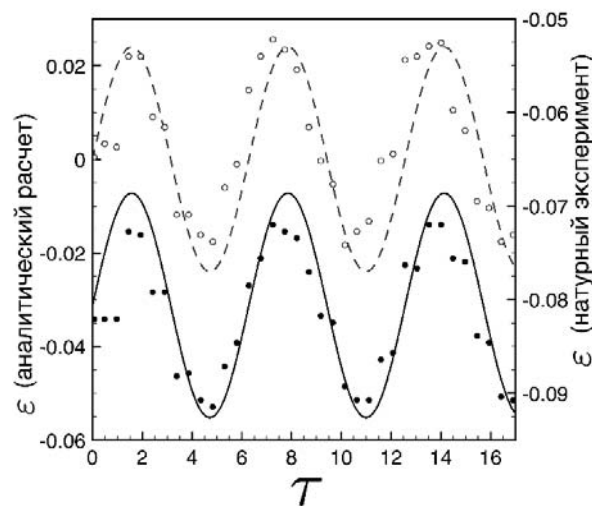


Рис. 8. Бифуркационные значения параметра ϵ , соответствующие касательной бифуркации циклов и субкритической бифуркации Андронова – Хопфа в детерминированном генераторе с цепочкой ЗОС при различных значениях времени запаздывания. Пунктирная и сплошная линии представляют результаты, полученные аналитически для бифуркации Андронова – Хопфа и касательной бифуркации соответственно [22], кружки соответствуют результатам экспериментальных измерений при $K = 0.24$, $\mu = 0.5$, $\omega_0 = 1$

Данные эксперимента сопоставляются с аналитическими результатами, полученными для модели (7) с использованием квазигармонического приближения и метода усреднения [22]. Как экспериментальные данные, так и теория показывают, что бифуркационные значения смещаются при изменении времени запаздывания τ .

Для $\tau = \left(\frac{1}{4} + n\right)T$, $n = 0, 1, 2, \dots$ наблюдается максимальное смещение в положительном направлении, т.е. бифуркационные значения ϵ для обеих бифуркаций максимально велики. В результате генератор оказывается дальше от порога генерации, что приводит к ухудшению характеристик



КР и выражается в минимальном времени корреляции колебаний. При $\tau = \left(\frac{3}{4} + n\right)T$ имеет место максимальное отрицательное смещение, и соответствующие бифуркационные значения являются наименьшими. Генератор приближается к порогу генерации, соответствующему касательной бифуркации, и время корреляции стохастических колебаний становится максимальным.

Заключение

Проведенные натурные эксперименты полностью подтвердили возможность управления характеристиками когерентного резонанса, как для классической модели возбудимого осциллятора, так и в системе, не относящейся к классу возбудимых осцилляторов.

Было показано, что в обоих случаях степень когерентности индуцированных шумом колебаний, оцениваемая по времени корреляции, немонотонным образом меняется при изменении времени запаздывания дополнительной цепи ЗОС и при некоторых значениях времени запаздывания значительно превосходит когерентность колебаний в системе без ЗОС. Результаты экспериментальных исследований влияния ЗОС на эффект КР находятся в хорошем соответствии с аналитическими результатами и данными численного моделирования. Экспериментально подтвержден механизм влияния ЗОС на степень когерентности колебаний в генераторе с жестким возбуждением. Как и предполагалось теоретически, он связан со сдвигом бифуркационных значений управляющего параметра при изменении характеристик ЗОС. Механизм управления КР в возбудимых осцилляторах типа осциллятора ФицХью – Нагумо, по-видимому, является несколько иным [18]. В проведенных экспериментах с моделью возбудимого осциллятора было установлено отсутствие влияния времени запаздывания на бифуркационные значения управляющих параметров, однако причина влияния ЗОС на время корреляции в эксперименте не была установлена.

Работа выполнена при частичной финансовой поддержке РФФИ (проект № 15-02-02288) и Министерства образования и науки РФ в рамках государственного задания (код проекта 1008).

Список литературы

1. Hu G., Ditzinger T., Ning C. Z., Haken H. Stochastic resonance without external periodic force // Phys. Rev. Lett. 1993. Vol. 71. P. 807–810.
2. Pikovsky A., Kurths J. Coherence resonance in a noise-driven excitable system // Phys. Rev. Lett. 1997. Vol. 78. P. 775–778.
3. Lindner B., Schimansky-Geier L. Analytical approach to the stochastic FitzHugh-Nagumo system and coherence resonance // Phys. Rev. E. 1999. Vol. 60. P. 7270–7276.
4. Lindner B., Garcia-Ojalvo J., Neiman A. B., Schimansky-Geier L. Effects of noise in excitable systems // Phys. Rep. 2004. Vol. 392. P. 321–424.
5. FitzHugh R. A. Impulses and physiological states in theoretical models of nerve membrane // Biophys. J. 1961. Vol. 1. P. 445–466.
6. Nagumo J. S., Arimoto S., Yoshizawa S. An active pulse transmission line simulating nerve axon // Proceedings of the Institute of Radio Engineers. 1962. Vol. 50. P. 2061–2071.
7. Ushakov O. V., Wünsche H. J., Henneberger F., Khovanov I. A., Schimansky-Geier L., Zaks M. A. Coherence resonance near a Hopf bifurcation // Phys. Rev. Lett. 2005. Vol. 95. 123903.
8. Zakharova A., Vadivasova T., Anishchenko V., Koseska A., Kurths J. Stochastic bifurcations and coherence resonance in a self-sustained bistable noisy oscillator // Phys. Rev. E. 2010. Vol. 81. 011106.
9. Feoktistov A., Anishchenko V. Coherence resonance and synchronization of stochastic self-sustained oscillations in hard excitation oscillator // Rus. J. Nonlin. Dyn. 2012. Vol. 8. P. 897–911.
10. Zakharova A., Feoktistov A., Vadivasova T., Schöll E. Coherence resonance and stochastic synchronization in a nonlinear circuit near a subcritical Hopf bifurcation // Eur. Phys. J. Spec. Top. 2013. Vol. 222. P. 2481–2495.
11. Sethia G. C., Kurths J., Sen A. Coherence resonance in an excitable system with time delay // Phys. Lett. A. 2007. Vol. 364. P. 227–230.
12. Han S. K., Yim T. G., Postnov D. E., Sosnovtseva O. V. Interacting coherence resonance oscillators // Phys. Rev. Lett. 1999. Vol. 83. P. 1771–1774.
13. Neiman A., Schimansky-Geier L., Cornell-Bel A., Moss F. Noise-enhanced phase synchronization in excitable media // Phys. Rev. Lett. 1999. Vol. 83. P. 4896–4899.
14. Hu B., Zhou Ch. Phase synchronization in coupled nonidentical excitable systems and array-enhanced coherence resonance // Phys. Rev. E. 2000. Vol. 61 (2). P. 1001–1004.
15. Astakhov S., Feoktistov A., Anishchenko V., Kurths J. Synchronization of multi-frequency noise-induced oscillations // Chaos. 2011. Vol. 21. 047513.
16. Aust R., Hövel P., Hizanidis J., Schöll E. Delay control of coherence resonance in type-I excitable dynamics // Eur. Phys. J. ST. 2010. Vol. 187. P. 77–85.
17. Janson N. B., Balanov A. G., Schöll E. Delayed feedback



- as a means of control of noise-induced motion // Phys. Rev. Lett. 2004. Vol. 93 010601.
18. Prager T., Lerch H.-Ph., Schimansky-Geier L., Schöll E. Increase of coherence in excitable systems by delayed feedback // J. Phys. A : Math. Theor. 2007. Vol. 40. P. 11045–11055.
 19. Brandstetter S., Dahlem M. A., Schöll E. Interplay of time-delayed feedback control and temporally correlated noise in excitable systems // Philosophical Transactions of the Royal Society A : Mathematical, Physical and Engineering Sciences. 2010. Vol. 368. P. 391–421.
 20. Geffert P. M., Zakharova A., Vüllings A., Just W., Schöll E. Modulating coherence resonance in non-excitable systems by time-delayed feedback // Eur. Phys. J. B. 2014. Vol. 87. P. 291–304.
 21. Escalera Santos G. J., Escalona J., Parmananda P. Regulating noise-induced spiking using feedback // Phys. Rev. E. 2006. Vol. 73. P. 042102.
 22. Semenov V., Feoktistov A., Vadivasova T., Schöll E., Zakharova A. Time-delayed feedback control of coherence resonance near subcritical Hopf bifurcation : Theory versus experiment // Chaos. 2015. Vol. 25. P. 033111.
 23. FitzHugh R. Impulses and physiological states in theoretical models of nerve membrane // Biophysical J. 1961. Vol. 1 (6). P. 445–466.
 24. Nagumo J. S., Arimoto S., Yoshizawa S. An active pulse transmission line simulating nerve axon // Proceedings of the Institute of Radio Engineers. 1962. Vol. 50. P. 2061–2071.

УДК 537.8;533.951

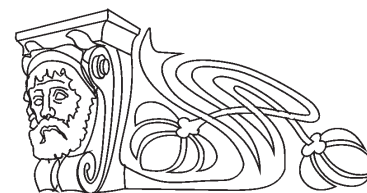
ПОЛНОЕ ПРЕОБРАЗОВАНИЕ ПОЛЯРИЗАЦИИ ТЕРАГЕРЦОВОГО ИЗЛУЧЕНИЯ МАССИВОМ ГРАФЕНОВЫХ МИКРОЛЕНТ БЕЗ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ МАГНИТНОГО ПОЛЯ

В. С. Мельникова¹, О. В. Полищук², В. В. Попов^{1,2}

¹Саратовский государственный университет

²Саратовский филиал Института радиотехники и электроники им. В. А. Котельникова РАН

E-mail: MelnikovaVeronica@yandex.ru



Исследовано преобразование поляризации терагерцового излучения периодическим массивом графеновых микролент, расположенных на поверхности диэлектрика (призмы) с высоким показателем преломления. Преобразование поляризации на частоте плазменного резонанса происходит без приложения внешнего постоянного магнитного поля. Показано, что гигантское преобразование поляризации может быть достигнуто при полном внутреннем отражении терагерцовой волны от периодического массива графеновых микролент.

Ключевые слова: терагерцовое излучение, графен, плазмоны, преобразование поляризации.

Total Conversion of Terahertz Wave Polarization by Graphene Microribbon Array without Magnetic Field

V. S. Melnikova, O. V. Polischuk, V. V. Popov

The polarization conversion of terahertz radiation by the periodic array of graphene microribbons located at the surface of a high-refractive-index dielectric substrate (prizm) is studied theoretically. Polarization conversion at the plasmon resonance frequencies takes place without applying external DC magnetic field. It is shown that giant (up to total) polarization conversion can be reached at the total internal reflection of THz wave from the periodic array of graphene nanoribbons.

Key words: terahertz radiation, graphene, plasmons, polarization conversion.

DOI: 10.18500/1817-3020-2015-15-3-51-54

Введение

Известно, что преобразование поляризации электромагнитной волны может иметь место исключительно в системах, не обладающих зеркальной плоскостью симметрии. Обычно для нарушения зеркальной симметрии используют внешнее постоянное магнитное поле [1]. В практическом плане это приводит к существенному росту габаритов и веса преобразователей поляризации.

Графен демонстрирует сильный плазмонный отклик на терагерцовых (ТГц) частотах, что обусловлено как высокой плотностью, так и малой коллективной динамической массой свободных носителей [2, 3].

В данной работе теоретически исследуется преобразование поляризации ТГц волны двумерным периодическим массивом графеновых микролент, расположенных на поверхности раздела диэлектрика (призмы) с высоким показателем преломления. Показано, что в данной структуре возможно гигантское (практически полное) преобразование поляризации ТГц волны в режиме полного внутреннего отражения волны



от массива графеновых микролент в отсутствие внешнего постоянного магнитного поля.

1. Теоретическая модель

Периодический массив графеновых микролент находится на поверхности диэлектрика (призмы) с высокой диэлектрической постоянной $\epsilon_2 = 11,45$ (Si) (рис. 1). Плоская p -поляризованная ТГц волна падает на графен под углом θ . Направление периодичности массива графеновых микролент образует угол φ по отношению к плоскости падения ТГц волны. Нарушение зеркальной симметрии структуры, необходимое для преобразования поляризации, достигается при наклонном падении ТГц волны, когда направление периодичности массива графеновых микролент не лежит в плоскости падения падающей ТГц волны ($\varphi \neq 0$).

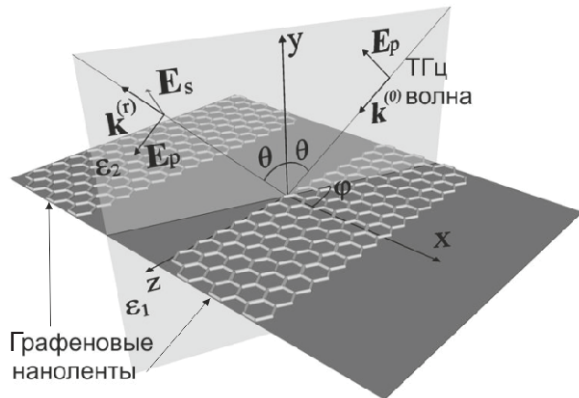


Рис. 1. Схематическое изображение структуры. Внешняя p -поляризованная ТГц волна падает на массив графеновых микролент под углом θ внутри более оптически плотной среды. Направление периодичности графеновых микролент образует угол φ по отношению к плоскости падения p -поляризованной ТГц волны

Решается полная система уравнений Максвелла с разложением искомых электрических и магнитных полей по плоским волнам. Вследствие периодичности структуры в x -направлении индуцированные электрические и магнитные поля можно разложить в ряд Фурье и переписать уравнения Максвелла в каждой среде в фурье-представлении. Использование стандартных электромагнитных граничных условий в плоскости $y = 0$ (в плоскости массива графеновых микролент) позволяет получить соотношение между амплитудами фурье-гармоник плотности электрического тока и электрического поля в этой плоскости. Графен описывается с помощью динамической проводимости [4]:

$$\frac{\sigma_{Gr}(\omega)}{\sigma_0} = \frac{8ik_B T}{\pi \hbar(\omega + i\gamma)} \ln \left[2 \cosh \left(\frac{E_F}{2k_B T} \right) \right] + G \left(\frac{\hbar\omega}{2} \right) + \frac{4i\hbar\omega}{\pi} \int_0^\infty \frac{G(\zeta) - G(\hbar\omega/2)}{(\hbar\omega)^2 - 4\zeta^2} d\zeta, \quad (1)$$

где

$$G(\zeta) = \frac{\sinh(\zeta / k_B T)}{\cosh(E_F / k_B T) + \cosh(\zeta / k_B T)}.$$

Здесь $\sigma_0 = e^2 / 4\hbar$, E_F – энергия Ферми, температура T полагается равной 300К, ω – круговая частота падающей ТГц электромагнитной волны, e – заряд электрона, k_B – постоянная Больцмана и \hbar – приведенная постоянная Планка. Первое слагаемое в формуле (1) описывает отклик в форме Друде с участием внутризонных процессов, описываемых феноменологической скоростью внутризонного рассеяния электронов γ . Второе слагаемое описывает межзонные переходы в графене.

Используя закон Ома в графене с проводимостью (1) совместно с выражением для плотности электрического тока, полученного из электромагнитных граничных условий, находим систему связанных интегральных уравнений для x - и z -компонент плотности электрического тока в графеновых микролентах. Данная система связанных интегральных уравнений решалась численно методом Галеркина с разложением искомых функций по ортогональным полиномам Лежандра.

2. Результаты и их обсуждение

На рис. 2 показан спектр ТГц поглощения в зависимости от величины энергии Ферми и частоты для режима полного внутреннего отражения (ПВО) $\theta > \theta_R$, где θ_R – угол полного внутреннего отражения ($\theta_R \approx 17^\circ$ при $\epsilon_2 = 11,45$) при $\gamma = 0$. В этом случае поглощение ТГц волны вызвано исключительно межзонной генерацией электронно-дырочных пар в графене и уменьшается с увеличением энергии Ферми. Светлые области на рис. 2 соответствуют основному и высшему плазмонным резонансам.

Тонкие светлые линии соответствуют слабому ТГц поглощению на частотах спутников основного и высшего плазмонных резонансов. Эти спутники не проявляются в спектрах поглощения в симметричной системе (при $\varphi = 0$) и приводят к слабому резонансному поглощению только при отсутствии зеркальной симметрии в рассматриваемой системе при $\varphi \neq 0$ и $\theta \neq 0$.

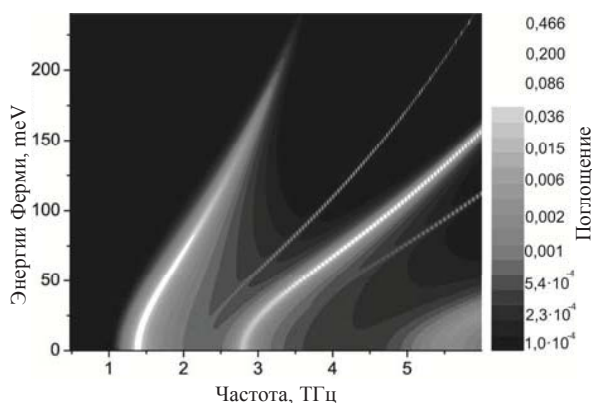


Рис. 2. Спектр ТГц поглощения в режиме полного внутреннего отражения ($\theta = \varphi = 45^\circ$) для массива графеновых микролент шириной 1 мкм с периодом 2 мкм как функция величины энергии Ферми и частоты для $\gamma = 0$. Светлые области соответствуют основному и высшему плазмонным резонансам

Определим коэффициент преобразования поляризации как отношение между потоками мощности s -поляризованной отраженной волны и падающей p -поляризованной волны. Как следует из рис. 3, коэффициент преобразования поляризации возрастает на несколько порядков величины на частотах плазменных резонансов и достигает единицы (что соответствует полному преобразованию поляризации) при высоких значениях энергии Ферми для случая $\gamma = 0$. Коэффициент преобразования поляризации и ширина резонанса преобразования поляризации возрастают вдоль лепестка плазмонного резонанса с ростом энергии Ферми вследствие того, что межзонное поглощение уменьшается с увеличением энергии Ферми.

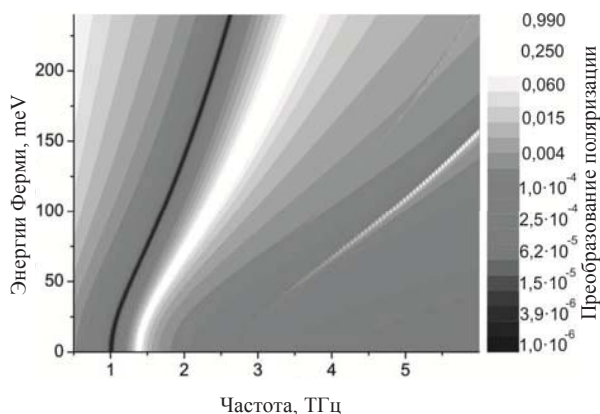


Рис. 3. Коэффициент преобразования поляризации в основном плазмонном резонансе в режиме полного внутреннего отражения ($\theta = \varphi = 45^\circ$) для массива графеновых микролент шириной 1 мкм с периодом 2 мкм как функция энергии Ферми и частоты при $\gamma = 0$

Нулевые значения преобразования поляризации (черная линия на рис. 3) в низкочастотной области фундаментального плазмонного резонанса возникает из-за асимметричной (типа Фано) формы резонанса преобразования поляризации.

Поскольку период рассматриваемого массива графеновых микролент намного меньше, чем длина волны падающей ТГц волны, массив можно рассматривать как анизотропную резонансную метаповерхность. Преобразование поляризации ТГц волны возникает из-за анизотропии плазмонного отклика массива графеновых микролент для компонент электрического поля, направленного вдоль и поперек графеновых микролент. Полное преобразование поляризации возникает в том случае, когда отраженная волна с исходной поляризацией полностью гасится отраженной волной с той же поляризацией, индуцированной плазменными колебаниями в массиве графеновых микролент.

Расчеты, выполненные для реалистичных параметров массива графеновых микролент при комнатной температуре (рис. 4), показывают возможность получения гигантских (до 70%) значений коэффициента преобразования поляризации ТГц волны по отношению к падающей волне. Часть мощности (порядка 30%) падающей волны теряется за счет поглощения в графене, главным образом, в результате внутризонных процессов рассеяния свободных носителей заряда (первое слагаемое в формуле (1) при $\gamma = 0$). В то же время отраженная от массива графеновых микролент ТГц волна имеет строго ортогональную поляризацию электрического поля по отношению к падающей волне.

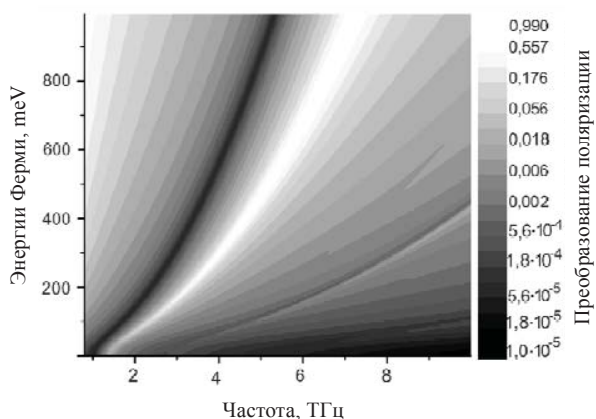


Рис. 4. Коэффициент преобразования поляризации в основном плазмонном резонансе в режиме полного внутреннего отражения ($\theta = \varphi = 45^\circ$) для массива графеновых микролент шириной 1 мкм с периодом 2 мкм как функция энергии Ферми и частоты при $\gamma = 10^{12} \text{c}^{-1}$



Заметим, что процесс преобразования поляризации волны в данной структуре является взаимным. Таким образом, падающая ТГц волна с s -поляризацией будет преобразовываться в волну с p -поляризацией с тем же самым коэффициентом преобразования.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проект № 14-02-92102).

Список литературы

1. Crassee I., Levallois J., Walter A. L., Ostler M., Bostwick A., Rotenberg E., Seyller T., D., van der Marell, Kuzmenko A. B. Giant Faraday rotation in single- and multilayer graphene // *Nature Physics*. 2011. Vol. 7. P. 48–51.
2. Chen J., Badioli M., Alonso-González P., Thonggrattanasiri S., Huth F., Hillenbrand R., Koppens F. Optical nano-imaging of gate-tunable graphene plasmons // *Nature*. 2012. Vol. 487. P. 77–81.
3. Fei Z., Rodin A. S., Andreev G. O., Bao W., McLeod A. S., Wagner M., Zhang L. M., Zhao Z., Thiemens M., Dominguez G., Fogler M. M., Castro Neto A. H., Lau C. N., Keilmann F., Basov D. N. Gate-tuning of graphene plasmons revealed by infrared nano-imaging // *Nature*. 2012. Vol. 487. P. 82–85.
4. Falkovsky L. A., Varlamov A. A. Space-time dispersion of graphene conductivity // *Eur. Phys. J. B*. 2007. Vol. 56, № 4. P. 281–284.



ХРОНИКА

УДК 53(091), 53(092)

КАФЕДРЕ ФИЗИКИ ТВЕРДОГО ТЕЛА 70 ЛЕТ

Д. А. Усанов

Саратовский государственный университет
E-mail: usanovda@info.sgu.ru

Кратко изложена история развития кафедры физики твердого тела. Приведены сведения об основных результатах работы коллектива кафедры за последние 10 лет. Охарактеризованы достижения профессоров кафедры в области инновации, научной деятельности, в сфере подготовки кадров высшей квалификации. Приведены сведения о достижениях молодых преподавателей и аспирантов.

Ключевые слова: Саратовский университет, кафедра физики твёрдого тела, инновации.

70 years of the Department of Solid State Physics

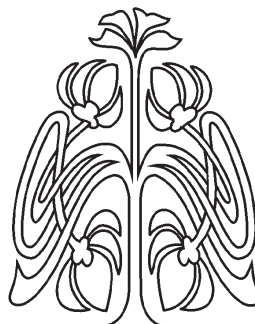
D. A. Usanov

The brief history of the department has been recited. The information about main results of solid state physics department teamwork for last 10 years has been presented. Professors' achievements in fields of innovations, research, and high school education have been characterized. The information about achievements of young lecturers and graduate students has been represented.

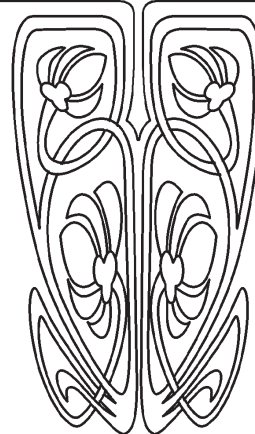
Key words: Saratov State University, Solid State Physics Department, innovations.

DOI: 10.18500/1817-3020-2015-15-3-55-61

В 2015 году кафедра физики твердого тела Саратовского государственного университета, одна из старейших университетских кафедр, отмечает свое семидесятилетие. Для научно-педагогического коллектива это немалый срок. Все 70 лет кафедра сохраняла свое название, данное ей в самом начале. Для такого постоянства есть объективные обстоятельства. Коллектив кафедры еще до его оформления в современном виде был сформирован ближайшим сотрудником академика А. Ф. Иоффе – В. П. Жузе, автором открытий в области физики полупроводников и экспериментов, имевших высокую значимость для понимания роли примесей в полупроводниках. Успехи в области физики полупроводников стали возможными в связи с развитием квантовой теории твердого тела, являющейся для нее базовым разделом. Все последующие годы коллектив кафедры готовил специалистов и занимался научными исследованиями в области физики полупроводников и появившимися направлениями науки в микроэлектронике и нанoeлектронике. Специалисты этого профиля были востребованы промышленностью СССР и, в том числе, предприятиями г. Саратова. Исследования в области физики полупроводников получили финансовую поддержку со стороны государства в виде бюджетного финансирования и со стороны промышленных предприятий в виде хозяйственных договоров. Работы в этом направлении многие годы



ПРИЛОЖЕНИЯ





возглавляла З. И. Кирьяшкина, заведовавшая кафедрой до 1985 года, заслуженный деятель науки РФ, кавалер орденов Ленина, Знак Почёта, многих медалей. Под научным руководством З. И. Кирьяшкиной работала проблемная лаборатория полупроводников, отдел физики полупроводников в НИИМФ численностью более 100 сотрудников. В этих подразделениях были выполнены пионерские исследования в области измерения параметров полупроводников СВЧ-методами, созданы полупроводниковые СВЧ-детекторы, многие годы обладавшие рекордными основными характеристиками по сравнению с приборами такого типа. Конструкция изготавливаемого в лаборатории полупроводников СВЧ-детектора была защищена авторским свидетельством.

История развития кафедры до 2005 года была описана в [1, 2]. В последующее десятилетие коллектив кафедры продолжал интенсивные научные исследования по направлению подготовки специалистов.

В коллективе кафедры в настоящее время работают преподаватели, имеющие большой стаж научно-педагогической деятельности, значимые научные и педагогические достижения; преподаватели средней возрастной группы, активно занимающиеся научной деятельностью и выполняющие большой объем методической работы, и молодые кандидаты наук, развивающие исследования, выполненные в рамках кандидатских диссертаций, совершенствующие педагогические навыки ведения лекционных и семинарских занятий.

Исследования в области оптоэлектроники продолжает профессор *В. Ф. Названов*. По этому направлению за прошедшие 10 лет под его руководством успешно защищена одна кандидатская диссертация, опубликовано 8 учебных пособий и монографий по современным направлениям оптоэлектроники. *В. Ф. Названов* ежегодно формулирует темы и руководит магистерскими и бакалаврскими работами по развиваемым им актуальным направлениям науки: физики фотонных кристаллов и физики плазмонов. В 2015 году *В. Ф. Названову* присвоено звание «Почетный работник высшего профессионального образования Российской Федерации».

Традиционно для кафедры и такое научное направление, как исследование эффектов взаимодействия СВЧ-излучения с полупроводниковыми структурами, активно развивал профессор *Ал. В. Скрипаль*. В последнее десятилетие его работы связаны с новым научным направлением – созданием способов и средств контроля с использованием методов ближнеполевой сканирующей



В. Ф. Названов



Ал. В. Скрипаль

СВЧ-микроскопии. За этот период им получено 20 патентов РФ на изобретения. Представленные в качестве экспонатов изделия по этим патентам отмечены Гран-при на 5-й Международной ярмарке изобретений SIIF-2009 (г. Сеул, Республика Корея), Гран-при «Agro Area» на 4-й Международной ярмарке инноваций, экологических идей и технологий в сельском хозяйстве и пищевой промышленности. Кроме того, за разработку новых типов приборов *Ал. В. Скрипаль* за этот



период был награжден 23 золотыми, 13 серебряными и 4 бронзовыми медалями международных конкурсов.

В 2008 году Ал. В. Скрипаль был отмечен золотыми медалями Международной федерации Ассоциации изобретателей (IFIA) за победы в финале Европейского и Всемирного туров конкурсов на лучшее изобретение в области компьютерных технологий. За добросовестный труд и профессионализм в работе Ал. В. Скрипаль был награжден Почетными грамотами Министерства промышленности и энергетики Саратовской области (2006 и 2012 гг.), Губернатора Саратовской области (2007 г.). Он награжден Почетным знаком «Во благо России» Федеральной службы по интеллектуальной собственности, патентам и товарным знакам (2009 г.), за заслуги перед космонавтикой – медалью имени Первого космонавта Земли Ю. А. Гагарина (2011 г.). В 2014 году Ал. В. Скрипаль было присвоено звание «Почетный работник высшего профессионального образования Российской Федерации».

Исследованием возможностей использования эффектов «ближнего поля» СВЧ для измерения параметров материалов и полупроводниковых приборов активно занимается профессор, доктор физико-математических наук С. С. Горбатов. По этому направлению им в 2011 году опубликована монография «Эффекты ближнего поля в электродинамических системах с неоднородностями и их использование в технике СВЧ». В монографии использованы материалы его докторской диссертации. За последние 10 лет С. С. Горбатов получил 5 патентов на изобретения. Он является автором изобретения на устройство СВЧ-смесителя с подавлением зеркального канала, внедренного в виде серии.

Использование предложенной конструкции ближнеполевого СВЧ-микроскопа позволило С. С. Горбатову с коллегами установить экспериментально эффект возникновения многодоменного режима в диодах Ганна и эффект возникновения пространственных пульсаций в *p-i-n*-диодах и описать эти эффекты теоретически. С. С. Горбатов по материалам своих научных исследований ежегодно формулирует темы бакалаврских и магистерских диссертаций. Под его руководством с 2005 года защищено три кандидатские диссертации.

Исследованием физики работы полупроводниковых приборов с управляемыми электрическим и магнитным полями характеристиками, обладающими участками с отрицатель-



С. С. Горбатов



А. А. Семенов

ным сопротивлением, занимается профессор А. А. Семенов. По материалам этих исследований он в 2010 г. защитил докторскую диссертацию, основные результаты которой изложены в монографии «Магнитоуправляемые полупроводниковые негатроны». А. А. Семенов изобрел новый тип электрически управляемой полупроводниковой индуктивности. По своим разработкам за последние 10 лет А. А. Семенов получил 4 патента на изобретения. А. А. Семенов читает лекционные курсы «Основы аналоговой электроники и схемотехники», «Устройство и применение микропроцессоров», «Микропроцессорные системы в измерительной технике» для факультета компьютерных наук и информационных технологий.

Исследованиями процессов безрадиационной высокопрецизионной обработки конденса-



рованных сред занимается доктор технических наук, профессор *Р. К. Яфаров*. Созданные им новые типы технологических установок внедрены в научных центрах Москвы, Зеленограда, С.-Петербурга и других городов. Под его руководством студенты кафедры имеют возможность проходить технологическую практику в лаборатории «Электронно-ионной субмикронной технологии» Саратовского филиала ИРЭ им. В. А. Котельникова РАН.



Р. К. Яфаров

Продолжает свою научно-педагогическую деятельность на кафедре в качестве профессора и исполнителя НИР *Ан. В. Скрипаль* – с 2005 года заведующий кафедрой медицинской физики факультета nano- и биомедицинских технологий СГУ. Совместно с сотрудниками кафедры физики твердого тела им за последние 10 лет получено 27 патентов на изобретения. Устройство «Видеоокулограф» и способ лечения с его помощью внедрены в клиническую практику в ряде городов нашей страны. По результатам экспонирования созданных с участием *Ан. В. Скрипаль* инноваций на международных конкурсах он награжден 12 золотыми, 5 серебряными и 2 бронзовыми медалями. С 2005 года *Ан. В. Скрипаль* является заместителем председателя оргкомитета ежегодной Всероссийской школы-семинара «Методы компьютерной диагностики в биологии и медицине», поддерживаемой грантами РФФИ и аккредитованной Фондом содействия развитию

малых форм предприятий в научно-технической сфере по программе У.М.Н.И.К. (Участник молодежного научно-инновационного конкурса). За последние 10 лет с участием *Ан. В. Скрипаль* опубликовано 140 статей в ведущих научных журналах, две монографии, издание одной из которых [3] поддержано грантом РФФИ. За добросовестный труд и высокий профессионализм в работе *Ан. В. Скрипаль* награждался Почетными грамотами Министерства промыш-



Ан. В. Скрипаль

ленности и энергетики Саратовской области (2006 г.), Министерства образования Саратовской области (2008 г.), Министерства образования и науки РФ (2008 г.). В 2009 году ему была объявлена благодарность от имени Губернатора Саратовской области.

С 2012 года к подготовке специалистов по направлению кафедры подключились сотрудники ЗАО НПЦ «Алмаз-Фазотрон» – лауреат Государственной премии СССР, профессор *В. Н. Посадский* – советник генерального директора и *В. С. Тяжлов*, кандидат физико-математических наук, заместитель генерального директора по научной работе. Между СГУ и ЗАО «Алмаз-Фазотрон» заключены договоры на проведение практик студентов 1-, 3-, 4- и 5-го курсов. По результатам практик 2014–2015 годов четверым студентам присвоен 3-й разряд по специальности «Регулировщик радиоэлектронной аппаратуры и приборов». За последние 10 лет на предприятие приняты на



В. Н. Посадский



В. С. Тяжлов

работу 37 выпускников кафедры, в настоящее время двое из них работают начальниками лабораторий, четверо – начальниками секторов, двое – ведущими инженерами, один – старшим научным сотрудником. Под руководством сотрудников кафедры работники предприятия ведут работу над диссертациями, защитили кандидатские диссертации аспиранты М. Ю. Куликов, А. В. Романов, три сотрудника предприятия обучаются в заочной аспирантуре при кафедре.

Лекционные курсы по квантовой механике, автоматизированным системами научных исследований и основам научно-технического творчества читает доцент кафедры А. Э. Постельга, в 2006 году защитивший диссертацию на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук. После защиты он продолжает активно заниматься научной работой. Им получены 5 патентов на изобретения, опубликовано 13 статей в журналах, входящих

в перечень ВАК, он руководит научной работой студентов кафедры и двух аспирантов.

В 2006 году кандидатскую диссертацию защитил доцент А. П. Рытик. К настоящему времени А. П. Рытик опубликовал более 100 научных работ, несколько учебных пособий. Он является автором 14 изобретений, обладателем грантов Президента РФ для поддержки молодых ученых – кандидатов наук (конкурсы 2007, 2012 гг.), конкурса У.М.Н.И.К. (2007 г.), гранта ИВТЕС-Russia (2009 г.), фонда В. Потанина «Преподаватель онлайн» (2012–2013 гг.), специальной государственной стипендии Правительства РФ (2005 г.). Отмечен Почетной грамотой Министерства промышленности и энергетики Саратовской области, награжден Гран-при, 5 золотыми, 11 серебряными медалями российских и зарубежных конкурсов изобретений. В 2009 году он стал лауреатом молодежной премии имени П. А. Столыпина.



А. Э. Постельга



А. П. Рытик



В 2012 году успешно защитил кандидатскую диссертацию доцент *Д. В. Пономарёв*. В 2009 году он выиграл грант по программе У.М.Н.И.К, в 2014 году стал победителем в конкурсе на получение стипендии Президента Российской Федерации. Является автором 10 статей в журналах, входящих в перечень ВАК, исполнителем опытно-конструкторской работы, ведущейся на кафедре по одному из его изобретений. Имеет три патента на изобретения.

Ежегодно курсовыми и бакалаврскими работами по актуальной тематике руководит доцент *Н. Б. Трофимова*.

В научных разработках кафедры по применению новых методик измерения характеристик объектов биофизики активно участвуют доценты *М. Ю. Калинин* и *В. Г. Ребров*. Результаты этих исследований опубликованы в ведущих научных журналах и оформлены в виде патентов на изобретение.

В научных исследованиях, проводимых на кафедре, участвуют сотрудники кафедры медицинской физики кандидаты физико-математических наук *С. Ю. Добдин*, *А. А. Сагайдачный*, *А. В. Фомин*. Они являются авторами изобретений, которые в рамках проектов по программе У.М.Н.И.К. готовят для внедрения в медицинскую практику. Отряд кандидатов наук в 2013–2015 годах пополнили *В. Ю. Кваско*, *А. П. Фролов*, *А. В. Фадеев*, *С. С. Янкин*, *А. Н. Литвиненко*.

По направлениям оригинальных научных исследований ежегодно выполняют бакалаврские и магистерские работы студенты кафедры. В организационной работе с бакалаврами и магистрами активное участие принимает заведующая лабораторией *Т. М. Гаманюк*.

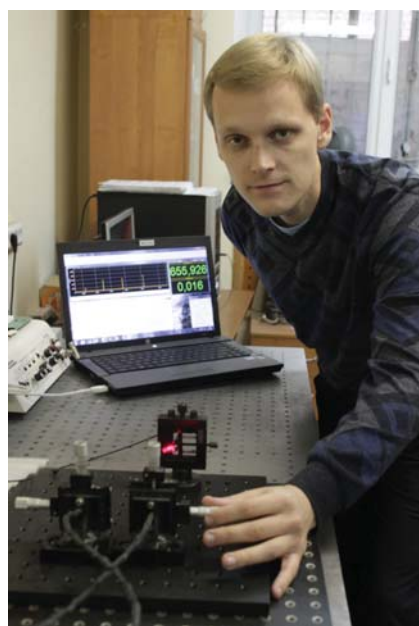
Подводя итог прошедшему десятилетию, можно отметить, что за последние 10 лет аспирантами и соискателями кафедры защищены 32 кандидатских и 3 докторские диссертации, сотрудниками кафедры получен 81 патент на изобретения, в журналах, входящих в перечень ВАК, опубликовано 159 статей. По результатам НИР выполнена опытно-конструкторская работа по созданию СВЧ согласованных нагрузок на разные частотные диапазоны, по заказам различных медицинских учреждений совместно с коллективом кафедры медицинской физики созданы защищенные патентом видеоокулографы, приобретенные медучреждениями для использования в офтальмологии. В подготовке конструкторской документации по реализации изобретений активное участие принимает доцент *В. Б. Феклистов*, имеющий 5 патентов на



Д. В. Пономарёв



Доцент Д. В. Пономарёв демонстрирует работу ближне-полевого СВЧ-микроскопа лауреату нобелевской премии академику Ж. И. Алфёрову



С. Ю. Добдин

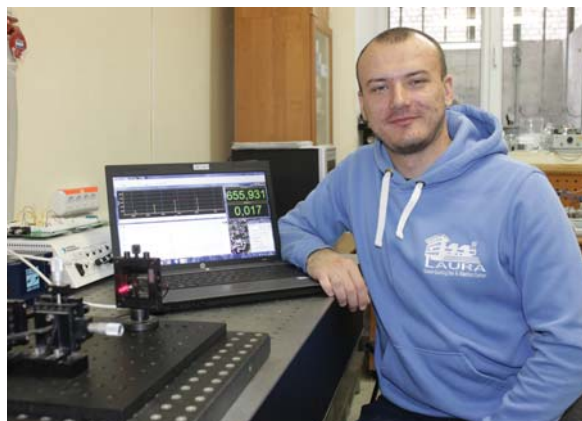


изобретения, 4 патента на полезную модель, который проводит большую работу по организации учебного процесса на кафедре.

Результаты научных исследований обобщены в 11 монографиях, в том числе в монографии «Полупроводниковые лазерные автодины для измерения параметров движения при микро- и наносмещениях» (Саратов : Изд-во Сарат. ун-та, 2014), поддержанной грантом РФФИ, и монографии «Биорадиолокация» (М. : Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2010). Результаты исследований использованы также в 10 учебных пособиях, опубликованных за этот период. Совместно с кафедрой медицинской физики в Саратовском университете с 2006 по 2015 год проводилась Ежегодная Всероссийская научная школа-семинар «Методы компьютерной диагностики в биологии и медицине». В работе школ, кроме отечественных ученых, принимали участие ученые, представляющие такие страны, как Испания, Германия, Украина, Беларусь, США, Азербайджан и др. Проведение школ поддерживалось грантами РФФИ. С 2014 года начала проводиться научная школа-семинар «Взаимодействие сверхвысокочастотного, терагерцового и оптического излучения с полупроводниковыми микро- и наноструктурами, метаматериалами и биообъектами».

Кафедра обладает современным измерительным оборудованием, сотрудники владеют оригинальными методами измерений параметров полупроводниковых структур. На базе кафедры выполняют исследования 15 аспирантов, в том числе 5, обучающихся по заочной форме. Завершает работу над диссертацией *Е. И. Астахов*. Им опубликовано 8 научных работ, в том числе 5 в журналах, входящих в перечень ВАК, получен патент на изобретение. *Е. И. Астахов* – победитель конкурса по программе У.М.Н.И.К. (2012–2014 гг.).

Активно работает над кандидатской диссертацией аспирант *А. А. Дорошенко*. Он автор 6 публикаций, в том числе трех работ в изданиях из перечня ВАК. Им получены 2 патента



Е. И. Астахов



А. А. Дорошенко

на изобретения. *А. А. Дорошенко* – победитель конкурса по программе У.М.Н.И.К.

В 2012 году коллектив кафедры был признан ведущей научно-образовательной школой Саратовского государственного университета.

Список литературы

1. *Усанов Д. А.* К 60-летию кафедры физики твердого тела // Изв. Сарат. ун-та. Нов. сер. Сер. Физика. 2006. Т. 6, вып. 1/2. С. 85–90.
2. *Усанов Д. А.* Кафедра физики твердого тела // Саратовский университет. 1995. № 11(1904).



СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

Антонов Игорь Николаевич – Саратовский государственный технический университет; энергетический факультет, кафедра «Автоматизированные электротехнологические установки и системы», профессор. E-mail: tmf@sgu.ru

Астахов Елисей Игоревич – Саратовский государственный университет им. Н. Г. Чернышевского (СГУ); факультет нано- и биомедицинских технологий, кафедра медицинской физики, аспирант; учебная лаборатория по полупроводниковой технике СГУ, младший научный сотрудник. E-mail: astakhovei@info.sgu.ru

Башкатов Алексей Николаевич – Саратовский государственный университет им. Н. Г. Чернышевского; физический факультет, Научно-образовательный институт оптики и биофотоники, доцент. E-mail: a.n.bashkatov@mail.ru

Боровкова Екатерина Игоревна – Саратовский государственный университет им. Н. Г. Чернышевского; факультет нано- и биомедицинских технологий, аспирант; Саратовский филиал Института радиотехники и электроники им. В. А. Котельникова РАН, базовая кафедра динамического моделирования и биомедицинской инженерии факультета нано- и биомедицинских технологий СГУ, ассистент. E-mail: rubanei@mail.ru

Вадивасова Татьяна Евгеньевна – Саратовский государственный университет им. Н. Г. Чернышевского; физический факультет, кафедра радиофизики и нелинейной динамики, профессор. E-mail: vadivasovate@yandex.ru

Генина Элина Алексеевна – Саратовский государственный университет им. Н. Г. Чернышевского; физический факультет, Научно-образовательный институт оптики и биофотоники, доцент. E-mail: eagenina@optics.sgu.ru

Добдин Сергей Юрьевич – Саратовский государственный университет им. Н. Г. Чернышевского; факультет нано- и биомедицинских технологий, кафедра медицинской физики, доцент. E-mail: sergant1986@ya.ua

Ерёмин Валерий Павлович – ОАО «НИИ-Тантал» (Саратов), главный конструктор по НИОКР. E-mail: market@pao-tantal.ru

Ежов Василий Александрович – Институт общей физики им. А. М. Прохорова РАН (Москва), старший научный сотрудник. E-mail: ezhov@3dstereo.ru

Захарова Анна Сергеевна – Институт теоретической физики Технического университета г. Берлина; кандидат физико-математических наук, сотрудник. E-mail: schoell@physik.tu-berlin.de

Каменских Татьяна Григорьевна – Саратовский государственный медицинский университет им. В. И. Разумовского; лечебный факультет, кафедра глазных болезней, заведующая кафедрой, профессор. E-mail: kamtanvan@mail.ru

Караваяев Анатолий Сергеевич – Саратовский государственный университет им. Н. Г. Чернышевского; факультет нано- и биомедицинских технологий, базовая кафедра динамического моделирования и биомедицинской инженерии факультета нано- и биомедицинских технологий СГУ в Саратовском филиале Института радиотехники и электроники им. В. А. Котельникова РАН, доцент; Саратовский филиал Института радиотехники и электроники им. В. А. Котельникова РАН, старший научный сотрудник. E-mail: karavaevas@gmail.com

Кочубей Вячеслав Иванович – Саратовский государственный университет им. Н. Г. Чернышевского; физический факультет, кафедра оптики и биофотоники, профессор. E-mail: kochubey@optics.sgu.ru

Лавкин Александр Григорьевич – Саратовский государственный университет им. Н. Г. Чернышевского; факультет компьютерных наук и информационных технологий, кафедра информационных систем и технологий в обучении, профессор, главный научный сотрудник. E-mail: tmf@sgu.ru

Максимова Людмила Александровна – Институт проблем точной механики и управления РАН (Саратов), лаборатория проблем когерентно-оптических измерений в точной механике, старший научный сотрудник. E-mail: MaksimovaLA@yandex.ru

Мысина Наталья Юрьевна – Саратовский государственный университет им. Н. Г. Чернышевского; физический факультет, Научно-образовательный институт оптики и биофотоники; Институт проблем точной механики и управления РАН (Саратов), лаборатория проблем когерентно-оптических измерений в точной механике, младший научный сотрудник. E-mail: NataliaMysina@yandex.ru

Мельникова Вероника Сергеевна – Саратовский государственный университет им. Н. Г. Чернышевского; физический факультет, базовая кафедра компьютерной физики и метаматериалов физического факультета СГУ в Саратовском филиале Института радиотехники и электроники им. В. А. Котельникова РАН, аспирант. E-mail: MelnikovaVeronica@yandex.ru

Мысенко Михаил Борисович – Саратовский государственный университет им. Н. Г. Чернышевского; физический факультет, кафедра теоретической физики, ведущий научный сотрудник. E-mail: mysenko@mail.ru

Полищук Ольга Витальевна – Саратовский филиал Института радиотехники и электроники им. В. А. Котельникова РАН, лаборатории фотоники, старший научный сотрудник. E-mail: polischuk.sfire@mail.ru

Попов Вячеслав Валентинович – Саратовский государственный университет им. Н. Г. Чернышевского; физический факультет, базовая кафедра компьютерной физики и метаматериалов физического факультета СГУ в Саратовском филиале Института радиотехники и электроники им. В. А. Котельникова РАН, профессор. E-mail: popov@soire.renet.ru

Пономаренко Владимир Иванович – Саратовский государственный университет им. Н. Г. Чернышевского; факультет нано- и биомедицинских технологий, базовая кафедра динамического моделирования и биомедицинской инженерии факультета нано- и биомедицинских технологий СГУ в Саратовском филиале Института радиотехники и электроники им. В. А. Котельникова РАН, профессор; Саратовский филиал Института радиотехники и электроники им. В. А. Котельникова РАН, ведущий научный сотрудник. E-mail: ponomarenkovi@gmail.com

Прохоров Михаил Дмитриевич – Саратовский филиал института радиотехники и электроники им. В. А. Котельникова РАН, ведущий научный сотрудник. E-mail: mdprokhorov@yandex.ru



Россошанский Андрей Владимирович – Саратовский государственный университет им. Н. Г. Чернышевского; Объединенный институт микро- и наноэлектроники, директор. E-mail: nova@sgu.ru

Рябухо Пётр Владимирович – Саратовский государственный университет им. Н. Г. Чернышевского, кафедра оптики и биофотоники, аспирант. E-mail: ryabukhopeter.optics@yandex.ru

Рябухо Владимир Петрович – Саратовский государственный университет им. Н. Г. Чернышевского; физический факультет, Научно-образовательный институт оптики и биофотоники, профессор; Институт проблем точной механики и управления РАН (Саратов), лаборатория проблем когерентно оптических измерений в точной механике, заведующий лабораторией. E-mail: rvp-optics@yandex.ru

Семенов Владимир Викторович – Саратовский государственный университет им. Н. Г. Чернышевского; физический факультет, кафедра радиофизики и нелинейной динамики, аспирант. E-mail: vsemenov90@mail.ru

Симоненко Георгий Валентинович – Саратовский государственный университет им. Н. Г. Чернышевского; физический факультет, Научно-образовательный институт оптики и биофотоники, профессор. E-mail: simonenko@optics.sgu.ru

Скрипаль Анатолий Владимирович – Саратовский государственный университет им. Н. Г. Чернышевского; факультет нано- и биомедицинских технологий, кафедра медицинской физики, заведующий кафедрой, профессор. E-mail: skripalav@info.sgu.ru

Студенцов Сергей Александрович – ООО «Фотон» (Саратов), заместитель директора. E-mail: lcspectrum@mail.ru

Тучин Валерий Викторович – Саратовский государственный университет им. Н. Г. Чернышевского, физический факультет, директор Научно-образовательного института оптики и биофотоники; профессор кафедры оптики и биофотоники; Институт точной механики и управления РАН (Саратов), лаборатория лазерной диагностики технических и живых систем, заведующий лабораторией; Международный научно-образовательный центр оптических технологий в промышленности и медицине «Фотоника» при СГУ, директор. E-mail: tuchin@sgu.ru

Усанов Дмитрий Александрович – Саратовский государственный университет им. Н. Г. Чернышевского, факультет нано- и биомедицинских технологий, кафедра физики твердого тела, заведующий кафедрой, профессор. E-mail: usanovda@info.sgu.ru

Экехард Шёлль – Институт теоретической физики Технического университета г. Берлина; профессор. E-mail: schoell@physik.tu-berlin.de

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Antonov Igor Nikolaevich – Saratov State Technical University; Energy Faculty, Department «Automated installation and system electrotechnological», Professor. E-mail: tmf@sgu.ru

Astakhov Elisey Igorevich – Saratov State University (SSU); Faculty of Nano- and Biomedical Technology, Department of Medical Physics, Graduate student; Educational Laboratory of Semiconductor Techniques SSU, Junior Researcher. E-mail: astakhovei@info.sgu.ru

Bashkatov Aleksey Nikolaevich – Saratov State University; Faculty of Physics, Education and Research Institute of Optics and Biophotonics, Associate Professor. E-mail: a.n.bashkatov@mail.ru

Borovkova Ekaterina Igorevna – Saratov State University; Faculty of Nano- and Biomedical Technology, Graduate student; Saratov Branch of Institute of Radioengineering and Electronics of Russian Academy of Sciences, Base Department of Dynamical Modeling and Biomedical Engineering of Faculty of Nano- and Biomedical technologies at SSU, Assistant. E-mail: rubanei@mail.ru

Dobdin Sergey Yurievich – Saratov State University; Faculty of Nano- and Biomedical Technology, Department of Medical Physics, Associate Professor. E-mail: sergant1986@ya.ua

Ekehard Sholl – Technical University of Berlin, Institute of Theoretical Physics, Professor. E-mail: schoell@physik.tu-berlin.de

Eryomin Valery Pavlovich – Open Society «Research Institute-Tantal» (Saratov), Chief Designer of Research and Development. E-mail: market@pao-tantal.ru

Ezhov Vasilii Alexandrovich – Institute of the General Physics of A. M. Prokhorov of Russian Academy of Sciences (Moscow), Senior researcher. E-mail: ezhov@3dstereo.ru

Genina Elina Alekseevna – Saratov State University; Faculty of Physics, Education and Research Institute of Optics and Biophotonics, Associate Professor. E-mail: eagenina@optics.sgu.ru

Kamenskih Tatiana Grigoryevna – Saratov State Medical University named after V. I. Razumovsky; Therapeutical Faculty, Department of Ophthalmology, Head of the Department, Professor. E-mail: kamtanvan@mail.ru

Karavaev Anatoly Sergeevich – Saratov State University; Faculty of Nano- and Biomedical Technology, Base Department of Dynamical Modeling and Biomedical Engineering of Faculty of Nano- and Biomedical technologies at Saratov branch of Institute of Radioengineering and Electronics of Russian Academy of Sciences, Associate Professor; Saratov branch of Institute of Radioengineering and Electronics of Russian Academy of Sciences, Senior Researcher. E-mail: karavaevas@gmail.com

Kochubey Vyacheslav Ivanovich – Saratov State University; Faculty of Physics, Department of Optics and Biophotonics, Professor. E-mail: kochubey@optics.sgu.ru

Lavkin Alexander Grigorievich – Saratov State University; Faculty of Computer Science and Information Technologies, Department of Information Systems and Educational Technologies, Professor, Chief Researcher. E-mail: tmf@sgu.ru.

Maksimova Ludmila Aleksandrovna – Institute of Precision Mechanics and Control of Russian Academy of Sciences (Saratov), Laboratory Coherent Optical Measurements of the Exact Mechanics, Senior Researcher. E-mail: MaksimovaLA@yandex.ru



Melnikova Veronica Sergeevna – Saratov State University; Faculty of Physics, Department of Computer Physics and Physics Faculty of metamaterials Saratov branch of Institute of Radioengineering and Electronics of Russian Academy of Sciences, Graduate student. E-mail: MelnikovaVeronica@yandex.ru

Mysenko Mikhail Borisovich – Saratov State University; Faculty of Physics, Department of Theoretical Physics, Leading Researcher. E-mail: mysenko@mail.ru

Mysina Natalya Yurevna – Saratov State University; Faculty of Physics, Education and Research Institute of Optics and Biophotonics; Institute of Precision Mechanics and Control of Russian Academy of Sciences (Saratov), Junior Researcher. E-mail: NataliaMysina@yandex.ru

Polischuk Olga Vitalyevna – Saratov branch of Institute of Radioengineering and Electronics of Russian Academy of Sciences, Laboratory of Photonics, Senior Researcher. E-mail: polischuk.sfire@mail.ru

Ponomarenko Vladimir Ivanovich – Saratov State University; Faculty of Nano- and Biomedical Technology, Base Department of Dynamical Modeling and Biomedical Engineering of Faculty of Nano- and Biomedical technologies at Saratov branch of Institute of Radioengineering and Electronics of Russian Academy of Sciences, Professor; Saratov branch of Institute of Radioengineering and Electronics of Russian Academy of Sciences, Laboratory of Modelling in Nonlinear Dynamics, Leading Researcher. E-mail: ponomarenkovi@gmail.com

Popov Vyacheslav Valentinovich – Saratov State University; Faculty of Physics, Department of Computer Physics and Physics Faculty of Metamaterials at Saratov Branch of Institute of Radioengineering and Electronics of Russian Academy of Sciences, Professor. E-mail: popov@soire.renet.ru

Prohorov Mikhail Dmitrievich – Saratov branch of Institute of Radioengineering and Electronics of Russian Academy of Sciences, Leading Researcher. E-mail: mdprokhorov@yandex.ru

Rossoshanskiy Andrey Vladimirovich – Saratov State University; Joint Institute of Micro- and Nano-electronics, Director. E-mail: nova@sgu.ru

Ryabukho Peter Vladimirovich – Saratov State University; Faculty of Physics, Department of Optics and Biophotonics, Graduate student. E-mail: ryabukhopeter.optics@yandex.ru

Ryabukho Vladimir Petrovich – Saratov State University; Faculty of Physics, Education and Research Institute of Optics and Biophotonics, Professor; Institute of Precision Mechanics and Control of Russian Academy of Sciences (Saratov), Laboratory Coherent Optical Measurements of the Exact Mechanics, Head of laboratory. E-mail: rvp-optics@yandex.ru

Semenov Vladimir Viktorovich – Saratov State University; Faculty of Physics, Department of Radiophysics and Nonlinear Dynamics, Graduate student. E-mail: vsemenov90@mail.ru

Simonenko Georgiy Valentinovich – Saratov State University; Faculty of Physics, Education and Research Institute of Optics and Biophotonics, Professor. E-mail: simonenko@optics.sgu.ru

Skripal Anatoly Vladimirovich – Saratov State University; Faculty of Nano- and Biomedical technologies, Department of Medical Physics, Head of Department, Professor. E-mail: skripalav@info.sgu.ru

Studentsov Sergey Alexandrovich – Research and Production Enterprise «Photon» (Saratov), Deputy Director. E-mail: lcspectrum@mail.ru

Tuchin Valeriy Viktorovich – Saratov State University; Faculty of Physics, Director of Education and Research Institute of Optics and Biophotonics, Professor of Department of Optics and Biophotonics, Institute of Precision Mechanics and Control of Russian Academy of Sciences (Saratov), Head of the Laboratory of laser diagnostics and technology of living systems; International Scientific and Educational Center of optical technologies in industry and medicine, «Photonica» SGU, Director. E-mail: tuchin@sgu.ru

Usanov Dmitriy Aleksandrovich – Saratov State University; Faculty of Nano- and Biomedical technologies, Department of Solid Body Physics, Head of Department, Professor. E-mail: usanovda@info.sgu.ru

Vadivasova Tatiana Evgenevna – Saratov State University; Faculty of Physics, Department of Radiophysics and Nonlinear Dynamics, Professor. E-mail: vadivasovate@yandex.ru

Zakharova Anna Sergeevna – Institute of Theoretical Physics, Technical University of Berlin; Candidate of Physical and Mathematical Sciences, Collaborator. E-mail: schoell@physik.tu-berlin.de