

## ОТЗЫВ

официального оппонента, д.ф.-м.н., профессора Захарова Валерия Павловича о диссертации Ушаковой Екатерины Владимировны «Спекл-корреляционная и флуоресцентная диагностика эволюционирующих полимерных пен: развитие физических принципов и инструментальная реализация», представленной на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.6. – Оптика

### **Актуальность диссертационной работы**

Диссертационная работа Ушаковой Екатерины Владимировны посвящена разработке и экспериментальной верификации методов спекл-корреляционной и флуоресцентной диагностики синтезируемых полимерных пен. Тема диссертационной работы безусловно является актуальной, поскольку полимерные пены широко применяются в различных отраслях современной науки и техники. В настоящее время, несмотря на высокий уровень развития технологий синтеза полимерных пен (в том числе и с применением сверхкритических флюидных технологий), практически отсутствуют эффективные методы контроля структуры и функциональных свойств, формируемых высокопористых полимерных матриц. Выбор оптимальных режимов синтеза осуществляется на основе апостериорного анализа получаемых материалов с использованием традиционных методов материаловедения. Разработанные в ходе выполнения работы методы лазерной диагностики (в частности, метод синтеза пространственно-временных спекл-текстур и оценок среднего времени жизни динамических спеклов) позволяют решить проблему мониторинга структурного состояния синтезируемых полимерных пен непосредственно в процессе вспенивания. Кроме того, автором диссертации получен ряд новых теоретических и экспериментальных результатов в области оптики пен и пеноподобных материалов, что имеет важное значение с точки зрения дальнейшего развития фундаментальных представлений об особенностях переноса лазерного и широкополосного излучения в случайно-неоднородных средах со сложной

структурой и динамикой. Таким образом, данное диссертационное исследование несомненно является актуальным и значимым.

**Научная новизна диссертационной работы** заключается в разработке, теоретическом обосновании и экспериментальной проверке методов анализа и отображения пространственно-временной динамики спекл-модулированных оптических полей, образующихся при многократном рассеянии лазерного излучения в существенно нестационарных случайно-неоднородных средах, каковыми являются синтезируемые полимерные пены. Следует особо отметить установленный в диссертационной работе новый фундаментальный результат об инвариантности среднего времени жизни динамических спеклов по отношению к типу микроскопической динамики рассеивающих центров в зондируемой среде. Этот научный результат открывает новые возможности в части применения методов зондирования случайно-неоднородных сред с использованием эффекта многократного динамического рассеяния лазерного излучения. К числу новых результатов, имеющих высокую научную значимость, следует также отнести вывод о значительном влиянии квази-волноводного режима распространения излучения в стенках пор на генерацию индуцированной составляющей флуоресценции при лазерной накачке флуоресцирующих пен.

**Практическая значимость диссертационного исследования** заключается в создании комплекса диагностических методов и их инструментально-программного обеспечения для мониторинга структурного состояния полимерных пен и пеноподобных материалов как непосредственно в процессе их синтеза (метод синтеза пространственно-временных спекл-текстур путем преобразования последовательностей изображений динамических спекл-полей и оценок по полученным спекл-текстурам среднего времени жизни спеклов на различных стадиях эволюции системы), так и после стабилизации структуры (анализ спектральных свойств флуоресцентного отклика в зависимости от интенсивности лазерной накачки).

## **Структура и объем работы**

Диссертация состоит из введения, четырёх глав, заключения и списка использованных источников. Основное содержание работы представлено на 115 страницах; в работе содержится 31 рисунок и 2 таблицы. Список литературы включает в себя 123 цитируемых источника.

Во **введении** автор формирует цель и основные задачи исследования, обосновывает актуальность темы диссертационной работы, представляет защищаемые положения, описывает практическую значимость и научную новизну полученных результатов.

В **Главе 1** проведен обзор существующих методов диагностики пен, выявлены их преимущества и ограничения. Обоснована необходимость разработки новых подходов к диагностике нестационарных сред со сложной структурой и динамикой, основанных на спекл-корреляционной и флуоресцентной технологиях.

В **Главе 2** описывается разработанный и апробированный в экспериментах прототип лабораторной системы, который позволяет реализовать синтез высокопористых полимерных матриц путем вспенивания пластифицированных полимеров с помощью сверхкритических флюидных технологий в атмосфере сверхкритического/субкритического диоксида углерода в широком интервале исходных условий по давлению, температуре и скорости сброса давления. Разработанный прототип позволяет осуществлять оптическую диагностику синтезируемых высокопористых полимерных матриц, в том числе и с использованием зондирующего лазерного излучения, на всех стадиях процесса. Представлены экспериментальные и теоретические результаты исследования динамики формирования и развития зародышей пор в полимерной матрице на стадии нуклеации, предшествующей стадии интенсивного расширения пены.

В **Главе 3** рассмотрены основные принципы спекл-корреляционной диагностики нестационарных случайно-неоднородных сред, специфическим случаем которых являются эволюционирующие полимерные пены. Обсуждены особенности гибридного подхода к анализу статистических и

корреляционных свойств пространственно-временных флуктуаций многократно рассеянного лазерного излучения, который используется в дальнейшем для теоретического обоснования оригинального метода синтеза пространственно-временных спекл-текстур. С использованием модели некоррелированных фазоров и Монте-Карло моделирования случайных фазовых набегов парциальных составляющих светового поля в зондируемой среде установлена инвариантность среднего времени жизни наблюдаемых динамических спеклов по отношению к типу динамики рассеивающих центров в среде. Обсуждены методические основы синтеза пространственно-временных спекл-структур на основе пост-обработки последовательностей изображений динамических спеклов, формируемых в результате многократного рассеяния зондирующего лазерного излучения. Разработана и проверена в экспериментах феноменологическая модель, описывающая взаимосвязь между средним временем жизни динамических спеклов и параметрами, характеризующими динамику расширения пены. Анализ этой взаимосвязи позволяет идентифицировать изменения структурных характеристик эволюционирующей пены, обусловленные изменением общего количества границ раздела "полимер - диоксид углерода" в объеме пены.

В **Главе 4** обсужден метод определения параметров структуры насыщенных лазерными красителями синтезированных полимерных пен на основе анализа спектральных характеристик их флуоресцентного отклика в зависимости от интенсивности лазерной накачки в полосе поглощения флуорофора. Представлены результаты экспериментальных исследований эффекта сужения спектра флуоресцентного отклика при возрастании интенсивности лазерной накачки на длине волны 532 нм насыщенных родамином 6Ж полилактидных пен и исходных полимеров с различной объемной долей красителя. Сужение спектра флуоресцентного отклика с ростом интенсивности накачки обусловлено увеличивающейся эффективностью возбуждения индуцированной составляющей флуоресценции и обычно интерпретируется как переход от режима

спонтанной флуоресценции к режиму стохастической лазерной генерации в накачиваемых системах. Увеличение доли индуцированной составляющей флуоресцентного отклика при прочих равных условиях обусловлено возрастанием времени нахождения квантов накачки и флуоресценции в накачиваемой среде. Предложена феноменологическая качественная модель, интерпретирующая наблюдаемое сужение спектра флуоресценции как проявление квази-волноводного эффекта распространения излучения в стенках пор.

При ознакомлении с диссертационной работой сформулированы следующие замечания.

1. В спекл-корреляционных экспериментах одними из ключевых параметров является длина когерентности зондирующего лазерного излучения и ее отношение к характерному масштабу распространения зондирующего излучения в диагностируемой среде. К сожалению, в диссертационной работе отсутствует анализ возможного влияния длины когерентности используемого лазера на результаты оценок среднего времени жизни динамических спеклов.

2. В разделе 3.2 диссертации следовало бы более подробно рассмотреть соотношение между средним размером спеклов в плоскости детектирования для используемых экспериментальных условий и размером пикселей используемой КМОП-камеры. Это соотношение оказывает ключевое влияние на адекватность отображения пространственных флуктуаций интенсивности камерой. Очевидно, когда средний размер спеклов меньше пикселя, это приводит к существенным отклонениям статистики регистрируемых флуктуаций интенсивности от реальной. Из рис. 3.6 следует, что средний размер спеклов для используемых экспериментальных условий порядка 2-3 пикселей. Достаточно ли это для адекватной обработки получаемых экспериментальных данных?

3. Рассмотренная в диссертации модель многократного динамического рассеяния лазерного излучения не учитывает эффект деполяризации зондирующего лазерного излучения при его распространении в случайно-



неоднородных средах. Хотелось бы видеть обоснование того, что пренебрежение эффектом деполяризации не оказывает существенного влияния на адекватность интерпретации полученных экспериментальных данных с использованием разработанной модели.

4. На всех графиках, представляющих экспериментальные данные, выборочно представляемые доверительные интервалы соответствуют уровню значимости 0.9. В тексте работы отсутствует комментарий, почему выбран именно этот уровень значимости, а не, например, 0.95?

Представленные замечания являются в значительной степени рекомендательными и не умаляют положительного впечатления от работы в целом. Диссертация Е.В. Ушаковой представляет собой законченное научное исследование, посвященное актуальной теме и характеризуемое высокой степенью научной новизны и практической значимости. Степень опубликования результатов (14 статей, 7 из которых в журналах, индексируемых в WoS и Scopus) и их апробации на российских и международных конференциях соответствуют уровню добротных диссертационных работ на соискание степени кандидата физико-математических наук. Работа написана хорошим профессиональным языком; автореферат полностью отражает содержание диссертации.

Обобщая вышеизложенное, считаю, что содержание диссертации «Спекл-корреляционная и флуоресцентная диагностика эволюционирующих полимерных пен: развитие физических принципов и инструментальная реализация» соответствует пунктам 5 («Развитие физических основ молекулярной оптики и спектроскопии. Частотная и пространственная дисперсия, поглощение, отражение, преломление и рассеяние света. Оптическая активность сред и структур.») и 7 («Излучение, поглощение и рассеяние света изолированными и взаимодействующими атомами, молекулами и ионами. Физические основы процессов люминесценции и спектроскопических методов исследования веществ. Поляризационные явления.») паспорта специальности 1.3.6. – Оптика. Диссертационная работа в полной мере соответствует предъявляемым к кандидатским диссертациям

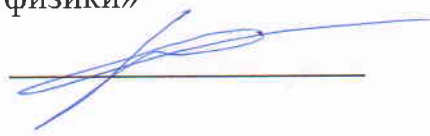
требованиям пунктов 9-11, 13, 14 «Положения о присуждении ученых степеней», утвержденного постановлением Правительства Российской Федерации от 24 сентября 2013 г. № 842. Автор диссертации, Ушакова Екатерина Владимировна, заслуживает присуждения учёной степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.6. – Оптика.

### Официальный оппонент

Заведующий кафедрой лазерных и биотехнических систем федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королева» (Самарский университет им. Королева), профессор, доктор физико-математических наук по специальности 1.3.2- «Приборы и методы экспериментальной физики»

Захаров Валерий Павлович

«12» сентября 2024 г.



### Адрес места работы:

федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королева»

Московское шоссе, д. 34, г. Самара, 443086

<https://ssau.ru/>

Телефон: +7 (846) 267-45-50

Email: [ssau@ssau.ru](mailto:ssau@ssau.ru)

