

ОТЗЫВ

официального оппонента

на диссертационную работу Ушаковой Екатерины Владимировны
«Спекл-корреляционная и флуоресцентная диагностика
эволюционирующих полимерных пен: развитие физических принципов
и инструментальная реализация», представленную на соискание ученой
степени кандидата физико-математических наук
по специальности 1.3.6. – Оптика

Диссертация Ушаковой Екатерины Владимировны посвящена разработке методов исследования пористых сред в процессе их синтеза с использованием принципов спекл-корреляционного анализа и флуоресцентной визуализации.

Актуальность диссертационной работы Е.В. Ушаковой обусловлена необходимостью развития эффективных методов бесконтактного контроля структуры и функциональных свойств инновационных материалов, к которым относятся и рассмотренные в работе пеноподобные среды, в процессе их синтеза. Подобные материалы широко используются в различных областях современной науки и техники, начиная от регенеративной медицины и тканевой инженерии (создание высокопористых скаффолдов на основе биосовместимых и биорезорбируемых полимерных материалов), и заканчивая энергетикой (например, пористые материалы для электрохимических источников питания). Следует отметить, что в большинстве случаев возможности контроля процессов формирования структуры подобных материалов непосредственно в процессе синтеза с использованием традиционных методов материаловедения (электронная и оптическая микроскопия, ультразвуковая диагностика, оптическая когерентная томография, рентгеновские методы) существенно ограничены. Предложенные в диссертационной работе Е.В. Ушаковой методы и подходы на основе спекл-корреляционного зондирования эволюционирующих пен позволяют решить проблему анализа процесса формирования структуры синтезируемых высокопористых материалов непосредственно в процессе вспенивания.

Другим не менее важным обстоятельством является необходимость дальнейшего уточнения фундаментальных представлений об особенностях переноса лазерного и широкополосного оптического излучения в пеноподобных материалах как специфической форме многократно рассеивающих случайно-неоднородных сред. Таким образом,

диссертационная работа Е.В. Ушаковой несомненно является актуальным и своевременным вкладом в научное направление, связанное с оптической диагностикой объектов и сред со сложной структурой и динамикой.

Теоретическая и практическая значимость диссертационной работы. Теоретическая значимость работы состоит в разработке, обосновании и экспериментальной верификации новых методов анализа оптических сигналов, обусловленных многократным динамическим рассеянием лазерного излучения в существенно нестационарных случайно-неоднородных средах на основе синтеза пространственно-временных спекл-текстур и оценок среднего времени жизни динамических спеклов. Разработанные методы позволяют существенно расширить функциональные возможности спекл-корреляционной диагностики случайно-неоднородных сред со сложной динамикой и структурой. Установленное в ходе выполнения работы значительное влияние квази-волноводного эффекта на среднее время пребывания излучения накачки и флуоресценции в объеме накачиваемых лазерным светом флуоресцирующих полимерных пен является результатом, значимым с точки зрения развития фундаментальных представлений об особенностях переноса излучения в подобных системах. Практическая значимость работы состоит в разработке комплекса диагностических методов и их инструментально-программного обеспечения для анализа структуры полимерных пен непосредственно в процессе их формирования, применимых в различных областях современной науки и технологий, в которых используются пеноподобные материалы.

Личный вклад автора. Как следует из содержания диссертации и автореферата, Е.В. Ушакова принимала непосредственное ключевое участие в выполнении всех отраженных в диссертационной работе исследований, начиная от постановки задач и заканчивая анализом и обсуждением полученных результатов, подготовкой статей и докладов на конференциях.

Эксперименты по синтезу полилактидных пен с использованием метода многократного динамического рассеяния лазерного излучения для мониторинга эволюции пены и флуоресцентной диагностике синтезированных образцов проводились лично автором. Специальное программное обеспечение для теоретического моделирования динамического рассеяния лазерного излучения в расширяющихся пенах, процессов формирования структуры пены и синтеза пространственно-временных спекл-текстур разработано, верифицировано и использовано в исследованиях лично автором.

Анализ содержания диссертационной работы. Диссертация Ушаковой Екатерины Владимировны состоит из введения, четырёх глав,

заклучения, списка использованных источников и приложений. Основное содержание работы представлено на 115 страницах, 31 рисунке и в 2 таблицах. Список цитируемых источников состоит из 123 наименований.

Во введении сформулированы цель и основные задачи исследования, защищаемые положения, обоснованы научная новизна и практическая значимость полученных результатов, представлены данные об апробации работы.

Глава 1 посвящена рассмотрению современного состояния в предметной области диссертационной работы; проведен анализ существующих методов лазерной диагностики случайно-неоднородных сред, включая одноточечную/многоточечную диффузионно-волновую спектроскопию и анализ контраста лазерных спектров. Обсуждаются оптические характеристики пеноподобных материалов как специфического случая многократно рассеивающих случайно-неоднородных сред. Отмечается, что обсуждаемые методы обладают определенными ограничениями, не позволяющими их использовать для диагностики структуры и динамики пен непосредственно в процессе вспенивания. Сделан вывод о необходимости разработки методов диагностики, позволяющих преодолеть эти ограничения.

В Главе 2 представлены результаты разработки и экспериментальной верификации лабораторной сверхкритической флюидной технологии синтеза высокопористых полимерных матриц на основе гранулированного полилактида. Разработанный прототип лабораторной установки для сверхкритического флюидного вспенивания полимеров с возможностью оптического контроля процесса вспенивания позволяет реализовать синтез высокопористых полимерных матриц в широком интервале значений исходного давления и температуры вспенивающего агента (диоксида углерода) и скорости сброса давления. Представлены экспериментальные и теоретические результаты исследования динамики развития изолированных пор на стадии нуклеации, предшествующей стадии интенсивного расширения пены. Представлена феноменологическая модель для описания кинетики роста зародышей пор в зависимости от используемых условий, хорошо согласующаяся с наблюдаемым в экспериментах поведением зародышей; модель учитывает особенности поведения вспенивающего агента в окрестностях его критической точки. Установлены неизвестные ранее фундаментальные особенности возникновения и развития зародышей пор в формируемой полимерной пене (существование «мертвой зоны» по частоте появления зародышей вблизи значения критического давления диоксида

углерода; автомодельный характер развития зародышей). Дано теоретическое обоснование этих особенностей.

В Главе 3 рассмотрены физические принципы спекл-корреляционной диагностики расширяющихся полимерных пен; обсужден гибридный подход к оценке статистических и корреляционных характеристик рассеянного лазерного излучения. Представлены теоретические модели спекл-модуляции лазерного излучения в многократно рассеивающих случайно-неоднородных средах с различными типами микроскопической динамики рассеивающих центров. Разработаны, теоретически обоснованы и верифицированы в экспериментах методические основы отображения пространственно-временной динамики многократно рассеянного лазерного излучения путем синтеза пространственно-временных спекл-текстур. В результате теоретического моделирования установлено, что определяемое по пространственно-временным спекл-текстурам среднее время жизни динамических спеклов инвариантно по отношению к типу микроскопической динамики рассеивающих центров в зондируемой случайно-неоднородной среде. Разработана феноменологическая модель, устанавливающая взаимосвязь между средним временем жизни динамических спеклов и параметрами, характеризующими макроскопическую динамику эволюционирующей полимерной пены и числом пор в объеме пены. Сопоставление результатов моделирования с полученными в экспериментах зависимостями среднего времени жизни динамических спеклов и текущим объемом пены в различных условиях ее формирования показало хорошее соответствие между модельными и экспериментальными данными.

В Главе 4 представлены результаты диагностики синтезированных полилактидных пен с добавками родамина 6Ж с использованием анализа спектров их флуоресцентного отклика в зависимости от интенсивности импульсно-периодической накачки второй гармоникой YAG:Nd лазера (532 нм). Рассмотрена качественная модель, рассматривающая взаимосвязь эффективности возбуждения индуцированной составляющей флуоресценции в объеме пены со средним временем пребывания квантов накачки и флуоресценции в накачиваемой среде. Установлено, что значительное влияние на время пребывания квантов оказывает квази-волноводный эффект при распространении накачки и флуоресценции в стенках пор и по сетке каналов Плато-Гиббса.

В заключении обобщены основные результаты работы.

Основные результаты диссертационного исследования опубликованы в 14 статьях. 7 публикаций осуществлено в журналах, представленных в базах,

WoS и Scopus, причем 2 статьи в изданиях уровня Q1 (“Sensors”, “Polymers”) и 1 – в журнале уровня Q2 (“Photonics”). В ходе выполнения работы зарегистрированы 2 программы для ЭВМ. Полученные результаты прошли хорошую апробацию на 12 международных и российских конференциях высокого уровня.

При прочтении диссертационной работы были сформулированы нижеперечисленные замечания.

1. При использовании гибридного подхода к оценке статистических характеристик многократно рассеянного лазерного излучения актуальной задачей является получение адекватной функции плотности вероятности распределения парциальных составляющих рассеянного светового поля по путям распространения излучения в зондируемой среде. В случае Монте-Карло моделирования ключевыми параметрами при получении функции плотности вероятности является объем выборки (число фотонов, запускаемых в моделируемую среду) и число интервалов, используемых для восстановления функции плотности вероятности). К сожалению, в разделе 3.1 диссертационной работы отсутствуют какие-либо комментарии по этому поводу.

2. Подход к моделированию спекл-картины, получаемой при зондировании пеноподобной среды, в диссертационной работе основан на использовании метода Монте-Карло. Однако, в тексте диссертации отсутствует упоминание об используемой при моделировании фазовой функции рассеяния и ее факторе анизотропии, хотя эти параметры являются критическими при моделировании. В тексте работы имеется упоминание, что рассеяние считается изотропным по углу, однако, такое утверждение требует обоснования, поскольку, как показано в диссертации, размер пор может существенно превышать длину волны, что противоречит предположению о рэлеевском типе рассеивателей. Также было бы логично описать методику выбора величины коэффициента рассеяния как входного параметра для моделирования и его связь со средним размером пор.

3. При анализе динамики спеклов необходимо учитывать то обстоятельство, что на временную декорреляцию флуктуаций интенсивности оказывает влияние не только динамика рассеивающих центров в среде, но и флуктуации частоты и амплитуды зондирующего лазерного излучения. В спекл-корреляционных экспериментах, описанных в диссертационной работе, использовался гелий-неоновый лазер ГН-5П. В работе следовало бы дать оценки временной декорреляции интенсивности спеклов,

обусловленной нестабильностью лазерного источника, и подтвердить, что этот фактор несущественен для используемых экспериментальных условий. ни динамических спеклов.

4. Как следует из формулы 3.7, в качестве базовой характеристики спекла при спекл-корреляционном анализе выбрана яркость пикселя. Выбор такого параметра требует дополнительного пояснения в тексте диссертации. Более универсальным в данном случае выглядит выбор контраст спекла в качестве характеристики, что позволяет избежать влияния вариации интенсивности зондирующего излучения, а также необходимости выбора уровня отсечки при анализе спекл-структур.

5. Анализ пространственно-временных спекл-текстур в работе сводится к анализу изменений только по одной координате в пространстве (в частности, показан эффект дрейфа спеклов, когда трассы индивидуальных спеклов имеют наклон). Было бы логично обсудить пространственную зависимость наблюдаемых явлений: является ли распределение среднего времени жизни спеклов однородным по всей спекл-картине, или имеется пространственная неоднородность. Тот же вопрос относится и к наклонным трассам спеклов при дрейфе: как они будут выглядеть при анализе смещения по двум координатам.

Следует отметить, что эти замечания имеют частный характер и не влияют на общую положительную оценку работы Е.В. Ушаковой, которая безусловно является завершённым научным исследованием, направленным на решение актуальной проблемы современной оптики и соответствует паспорту специальности 1.3.6 – Оптика. Диссертация написана профессиональным научным языком, в списке цитируемых источников отражены ключевые публикации по направлению исследований. Автореферат в полной мере отражает содержание диссертационной работы.

На основании вышеизложенного считаю, что диссертационная работа «Спекл-корреляционная и флуоресцентная диагностика эволюционирующих полимерных пен: развитие физических принципов и инструментальная реализация» выполнена на высоком научном уровне и соответствует предъявляемым к кандидатским диссертациям требованиям пунктов 9-11, 13, 14 «Положения о присуждении ученых степеней», утверждённого 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 - **Кириллин Михаил Юрьевич**

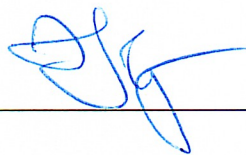
кандидат физико-математических наук по специальности 01.04.21 «Лазерная физика», старший научный сотрудник отдела радиофизических методов в медицине лаборатории биофотоники федерального государственного бюджетного научного учреждения «Федеральный исследовательский центр Институт прикладной физики им. А.В. Гапонова-Грехова Российской академии наук».

Почтовый адрес: 603950, г. Нижний Новгород, ул. Ульянова, 46

Электронная почта: kirillin@ipfran.ru

Телефон: +7 (831) 4164609

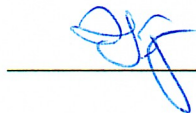
с.н.с., к.ф.-м.н.



М.Ю. Кириллин

11.09.2024

Даю своё согласие на включение моих персональных данных в документы, связанные с работой диссертационного совета и их дальнейшую обработку.



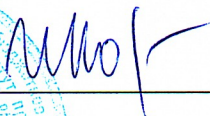
/М.Ю. Кириллин/

Подпись кандидата физико-математических наук, старшего научного сотрудника М.Ю. Кириллина заверяю:

Ученый секретарь ИПФ РАН

к.ф.-м. н., с.н.с.

Корюкин Игорь Валерьевич



_____ 2024 г.

Тел. +7 (831) 436-86-10; e-mail: igor@ipfran.ru

