

УДК 535.36, 535.37

doi: 10.17586/2226-1494-2019-19-3-387-393

НИЗКОКОГЕРЕНТНАЯ РЕФЛЕКТОМЕТРИЯ ФЛУОРЕСЦИРУЮЩИХ СЛУЧАЙНО-НЕОДНОРОДНЫХ СРЕД

А.А. Исаева, Е.А. Исаева, С.А. Ювченко, Д.А. Зимняков

Саратовский государственный технический имени Ю. А. Гагарина, Саратов, 410054, Российская Федерация
 Адрес для переписки: isanna.1987@mail.ru

Информация о статье

Поступила в редакцию 18.03.19, принята к печати 19.04.19
 Язык статьи — русский

Ссылка для цитирования: Исаева А.А., Исаева Е.А., Ювченко С.А., Зимняков Д.А. Низкокогерентная рефлектометрия флуоресцирующих случайно-неоднородных сред // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2019. Т. 19. № 3. С. 387–393. doi: 10.17586/2226-1494-2019-19-3-387-393

Аннотация

Предмет исследования. Для исследования флуоресцирующих случайно-неоднородных сред применен метод низкокогерентной рефлектометрии. В качестве флуоресцирующей случайно-неоднородной среды использовались слои плотноупакованных частиц диоксида титана, допированных красителем родамином 6G. **Метод.** Подход низкокогерентной рефлектометрии основан на анализе моментов флуктуаций интенсивности стохастических интерференционных полей второго и третьего порядков. Флуоресцентное излучение, индуцированное непрерывной лазерной накачкой в полосе поглощения флуорофора, формирует стохастическую интерференционную картину. Распределение интенсивности в стохастических интерференционных полях определяется соотношением длины когерентности флуоресцентного излучения и разностью оптических длин путей интерферирующих компонент поля. Для анализа стохастической интерференции в регистрируемом сигнале использована конфокальная схема детектирования. **Основные результаты.** По экспериментально полученным пространственным флуктуациям флуоресцентного излучения в спектральном диапазоне от 560 до 700 нм рассчитаны моменты второго и третьего порядков флуктуаций интенсивности для фиксированных длин волн и построены спектральные зависимости моментов. Показана взаимосвязь между статистическими моментами второго и третьего порядков многократно рассеянных компонент флуоресцентного излучения и параметрами функции когерентности излучения и функцией плотности вероятности оптических длин путей интерферирующих компонент. **Практическая значимость.** Рассмотренный метод может быть интерпретирован как метод восстановления оптических транспортных характеристик сред, основанный на сопоставлении экспериментально полученных статистических моментов флуктуаций интенсивности флуоресцирующего излучения и теоретически рассчитанных оптических транспортных параметров, восстановленных методом обратного Монте-Карло. Исследование фундаментальных процессов взаимодействия излучения со случайно-неоднородными рассеивающими средами с высоким квантовым выходом флуоресценции необходимо учитывать в методах спектроскопии при анализе функционального и морфологического состояний сложно структурированных сред, таких как слои биотканей, основанных на зондировании в полосах поглощения естественных и искусственно вводимых в ткань хромофоров.

Ключевые слова

низкокогерентная рефлектометрия, стохастическая интерференция, флуорофор, статистические моменты

Благодарности.

Исследование выполнено при финансовой поддержке гранта РФФИ в рамках научного проекта № 18-32-00584.

doi: 10.17586/2226-1494-2019-19-3-387-393

LOW-COHERENCE REFLECTOMETRY OF FLUORESCENT RANDOM MEDIA

A.A. Isaeva, E.A. Isaeva, S.A. Yuvchenko, D.A. Zimnyakov

Yuri Gagarin State Technical University of Saratov (SSTU), Saratov, 410054, Russian Federation
 Corresponding author: isanna.1987@mail.ru

Article info

Received 18.03.19, accepted 19.04.19
 Article in Russian

For citation: Isaeva A.A., Isaeva E.A., Yuvchenko S.A., Zimnyakov D.A. Low-coherence reflectometry of fluorescent random media. *Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics*, 2019, vol. 19, no. 3, pp. 387–393 (in Russian). doi: 10.17586/2226-1494-2019-19-3-387-393

Abstract

Subject of Research. The paper considers the application of low-coherence reflectometry to the study of laser-pumped dye-doped random medium. The densely packed layers of titanium dioxide nanoparticles doped by rhodamine 6G are used as a laser-pumped dye-doped random medium. **Method.** The method of low-coherence reflectometry is based on analysis of the second and the third-order moments of intensity fluctuations of stochastic interference fields. Fluorescence radiation induced by the continuous laser pumping in fluorophore absorption band forms a stochastic interference pattern. The intensity distribution in stochastic interference fields is described by the ratio of the coherence length of fluorescent radiation and the optical path length difference of the interfering field components. A confocal detection scheme is used for the stochastic interference analysis in the recorded signal. **Main Results.** The second and third-order moments of multiple scattered fluorescence intensity are calculated by experimentally obtained spatial fluctuations of fluorescent radiation limited by spectral range from 560 nm to 700 nm and spectral dependencies of moments are shown. The relationship is shown between the second and third-order statistical moments of the multiple scattered fluorescence radiation components and the coherence function and the probability density distribution of optical path lengths. **Practical Relevance.** The considered method can be interpreted as an approach to the reconstruction of media optical transport characteristics based on comparison of the experimentally obtained statistical moments of fluorescence intensity fluctuations and theoretically-derived optical transport characteristics recovered by reverse Monte Carlo method. The study of radiation interaction with randomly inhomogeneous scattering media with high fluorescence quantum yield should be taken into account when analyzing functional and morphological states of complexly structured media, such as layers of biotissues, based on probing in the absorption bands of chromophores in spectroscopic methods.

Keywords

low-coherence reflectometry, stochastic interference, fluorophore, statistical moments

Acknowledgements

The reported study was funded by the RFBR according to research project No.18-32-00584.

Введение

В настоящее время когерентно-оптические методы широко применяются для решения различных поставленных задач в материаловедении и биомедицине [1–5].

Методы обладают своими преимуществами и недостатками и имеют различные оптические схемы с использованием специализированных источников и детекторов излучения. Взаимодействие лазерного излучения со случайно-неоднородными многократно рассеивающими средами сопровождается амплитудной, фазовой, частотной модуляциями или изменением состояния поляризации зондирующего излучения [6–8]. Подобные модуляции приводят к формированию спекл- и интерференционных картин, статистический анализ которых позволяет получить необходимую информацию о структуре и динамике среды.

Методы низкокогерентной интерферометрии и оптической когерентной томографии обычно применяются к слабо рассеивающим средам и основаны на анализе отраженной компоненты электромагнитного поля, практически не изменяющей свое направление распространения [9–11]. Применение частотно-пространственной фильтрации и анализ диффузно рассеянных сложными системами составляющих поля позволит расширить функциональные возможности низкокогерентных методов зондирования объектов со сложной объемной структурой и создать основу для эффективной диагностики систем в биомедицине и материаловедении [12, 13].

В статичной среде с неподвижными рассеивателями рассеянное излучение формирует статическую спекл-модулированную картину, при этом не происходит временной декорреляции излучения. Такие среды могут выступать в роли многолучевых интерферометров со стохастически распределенными разностями путей интерферирующих лучей. Спекл-картины, модулирующие исходящий многократно рассеянный свет, связаны со стохастической интерференцией парциальных вкладов светового поля в среде [14, 15].

Таким образом, метод, основанный на статистическом анализе подобных стохастических интерференционных картин, может быть интерпретирован как метод безопорной стохастической интерферометрии или низкокогерентной рефлектометрии. Кроме того, корреляционные методы являются перспективными в области когерентно частотной диагностики стабильных сред.

Как правило, многократно рассеянный спекл-модулированный свет рассматривается в рамках приближения слабого рассеяния и описывается статистикой Релея флуктуаций интенсивности. Поля формируются при наложении двух полностью развитых спекл-структур с одинаковыми значениями средней интенсивности. Спекл-структуры соответствуют независимым ортогонально поляризованным компонентам распространяющегося в среде света [16, 17].

Подавление стохастической интерференционной модуляции прошедшего и многократно рассеянного средой излучения сопровождается переходом от когерентного рассеянного излучения к частично когерентному при условии, что средний оптический путь распространения света в среде порядка или превышает длину когерентности излучения. Анализ влияния длины когерентности зондирующего излучения и расчет таких статистических характеристик флуктуаций интенсивности рассеянного поля, как контраст или корреляционная функция, дают возможность оценить оптические транспортные свойства исследуемой среды и визуализировать структуру неоднородной среды.

Методика эксперимента

В работе рассмотрен метод анализа стохастической интерференции компонент излучения флуоресцирующих слоев диоксида титана, допированных красителем родамином 6 G на основе низкокогерентной рефлектометрии. На основе экспериментально полученных стохастически интерферирующих компонент флуоресцентного излучения были проведены оценки моментов флуктуаций интенсивности второго и третьего порядков. Схема экспериментальной установки показана на рис. 1.

Исследуемые среды представляли собой слои плотноупакованных наночастиц диоксида титана (ALDRICH MKBS9143V, средний размер частиц менее или равен 25 нм) допированных красителем родамином 6 G. Насыпная плотность частиц диоксида титана в слоях составляла $0,471 \text{ г/см}^3$. Толщина слоев зондируемых сред была равна 2 мм. Объемная доля флуорофора родамина 6 G в водном растворе была равной 0,005. Транспортные параметры среды описываются соотношением $L \times \mu_s \gg 1$, μ_s — коэффициент рассеяния среды, L — геометрическая толщина слоя.

Для анализа стохастической интерференции компонент излучения флуоресцирующих красителей среда возбуждалась непрерывным лазерным излучением с помощью полупроводникового лазера 1 с длиной волны 532 нм (твердотельный лазер с диодной накачкой, выходная мощность 50 мВт). Пучок лазерного излучения расширялся рассеивающей линзой 2 с фокусным расстоянием 200 мм. Для обеспечения стохастической интерференции в регистрируемом сигнале была использована конфокальная схема детектирования. Линейный транслятор 4 (STANDA 7T173) позволял реализовывать сканирование исследуемого образца 3 вдоль его поверхности. Флуоресцентный сигнал регистрировался с поверхности образца с использованием объектива 5 (Nikon, фокусное расстояние 16 мм) после его прохождения через входное отверстие оптического волокна 7 (Ocean Optics P100 UV-VIS). Объектив помещался на трехкоординатный моторизованный транслятор 6 (STANDA 7T38XYZ). Детектирование спектров флуоресценции осуществлялось в диапазоне длин волн 570–700 нм спектрометром 8 (Ocean Optics QE65000). Спектры флуоресценции со спектрометра выводились на экран персонального компьютера 9. Лазерное излучение, накачивающее среду, отсекалось с помощью светофильтра, пропускающего длины волн более 530 нм.

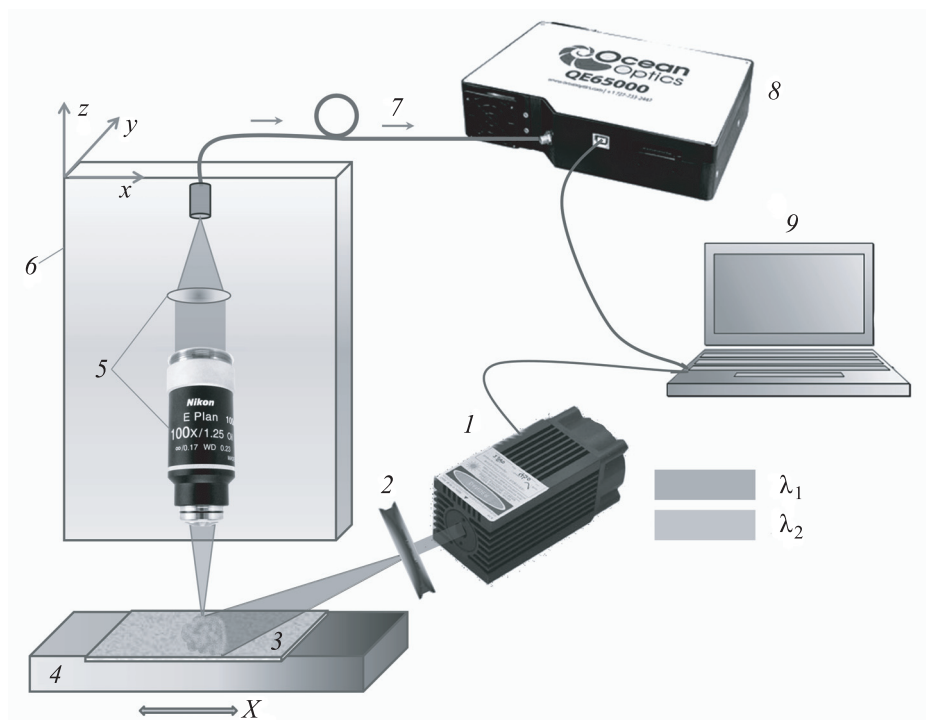


Рис. 1. Схема экспериментальной установки: 1 — полупроводниковый лазер; 2 — рассеивающая линза; 3 — исследуемый образец; 4 — линейный транслятор (X — ось смещения транслятора); 5 — объектив; 6 — трехкоординатный транслятор; 7 — оптическое волокно; 8 — спектрометр; 9 — персональный компьютер; λ_1 и λ_2 — длины волн, ограничивающие спектральный диапазон детектора

Обсуждение результатов

При рассмотрении стохастической интерференции компонент флуоресцентного излучения предполагалось, что квазимонохроматические волны ограничены спектральным диапазоном от λ до $\lambda + \Delta\lambda$, допустимым для используемого детектора, и выполнены условия квазимонохроматичности $\Delta\lambda \ll \lambda$, где λ — выбранная длина волны диапазона, $\Delta\lambda$ — диапазон длин волн, $\Delta\omega \ll \bar{\omega}$, где $\bar{\omega}$ — средняя частота

интерферирующих компонент флуоресцентного излучения, $\Delta\omega$ — ширина частотной полосы. При регистрации рассматриваются только источники флуоресценции. Флуоресцентное излучение инициируется непрерывным лазером в полосе поглощения флуоресцирующего красителя, распространяется в среде, испытывая многократные акты рассеяния на неподвижных рассеивателях, и интерферирует, формируя картину со случайным распределением интенсивности. Распространение флуоресцентного излучения может быть описано в рамках теории переноса излучения. Описание результирующих интерференционных полей зависит от соотношения длины когерентности l_c флуоресцентного излучения и разности оптических длин путей интерферирующих компонент Δs . В случае равномерного распределения спектральной плотности излучения в выбранном прямоугольном спектральном окне функцию когерентности источника излучения, зависящую от длины когерентности излучения и разности оптических длин путей компонент излучения,

можно записать как: $|g(l_c, \Delta s)| = \frac{\sin\left\{\frac{\pi\Delta s}{l_c}\right\}}{\pi\Delta s/l_c}$. Длина когерентности для разных компонент спектрального

диапазона $l_c = \lambda_c^2 / \Delta\lambda$ варьировалась в пределах от 0,40 до 0,62 мм.

При рассмотрении стохастической интерференции неполяризованных многократно рассеянных компонент флуоресцентного излучения регистрируемый сигнал можно представить в виде некогерентного сложения пары ортогонально поляризованных компонент поля $I = I_{\perp} + I_{\parallel}$. Кросс и ко-поляризованные компоненты поля I_{\perp} и I_{\parallel} являются статистически независимыми и обладают эквивалентными свойствами. Тогда нормированные значения моментов флуктуации интенсивности, представляемой как $I = I_{\perp} + I_{\parallel}$, второго (M_2) и третьего порядков (M_3) для неполяризованного излучения могут быть записаны как:

$$\begin{aligned}\langle I \rangle &= 2\langle I_{\perp, \parallel} \rangle, \\ \langle I^2 \rangle &= \langle (I_{\perp} + I_{\parallel})^2 \rangle = \langle I_{\perp}^2 \rangle + 2\langle I_{\perp} \rangle \langle I_{\parallel} \rangle + \langle I_{\parallel}^2 \rangle, \\ \langle I^3 \rangle &= \langle (I_{\perp} + I_{\parallel})^3 \rangle = \langle I_{\perp}^3 \rangle + 3\langle I_{\perp}^2 \rangle \langle I_{\parallel} \rangle + 3\langle I_{\perp} \rangle \langle I_{\parallel}^2 \rangle + \langle I_{\parallel}^3 \rangle, \\ M_2 &= \langle I^2 \rangle / \langle I \rangle^2 = \frac{2\langle I_{\perp, \parallel}^2 \rangle + 2\langle I_{\perp, \parallel} \rangle^2}{4\langle I_{\perp, \parallel} \rangle^2} = \frac{1\langle I_{\perp, \parallel}^2 \rangle}{2\langle I_{\perp, \parallel} \rangle^2} + \frac{1}{2}, \\ M_3 &= \langle I^3 \rangle / \langle I \rangle^3 = \frac{2\langle I_{\perp, \parallel}^3 \rangle + 6\langle I_{\perp, \parallel} \rangle^2 \langle I_{\perp, \parallel} \rangle}{8\langle I_{\perp, \parallel} \rangle^3} = \frac{1\langle I_{\perp, \parallel}^3 \rangle}{4\langle I_{\perp, \parallel} \rangle^3} + \frac{3\langle I_{\perp, \parallel}^2 \rangle}{4\langle I_{\perp, \parallel} \rangle^2}.\end{aligned}$$

Моменты второго и третьего порядков для неполяризованного излучения с плотностью оптических длин путей $\rho(\Delta s, \langle \Delta s \rangle)$ могут быть записаны как:

$$\begin{aligned}M_2(\lambda) &= \langle I^2 \rangle / \langle I \rangle^2 \approx 1 + \frac{1}{2} \int_0^\infty |g(l_c, \Delta s)|^2 \rho(\Delta s, \langle \Delta s \rangle) d(\Delta s), \\ M_3(\lambda) &= \langle I^3 \rangle / \langle I \rangle^3 \approx 1 + \frac{3}{2} \int_0^\infty |g(l_c, \Delta s)|^2 \rho(\Delta s, \langle \Delta s \rangle) d(\Delta s) + \frac{1}{2} \left(\int_0^\infty |g(l_c, \Delta s)|^2 \rho(\Delta s, \langle \Delta s \rangle) d(\Delta s) \right)^3,\end{aligned}$$

где d — изменение диапазона интегрирования.

Для расчета второго и третьего моментов флуктуации интенсивности (рис. 2), экспериментально полученных стохастически интерферирующих полей в заданном спектральном диапазоне, использовались выражения вида:

$$M_2(\lambda) = \langle I_{\lambda}^2 \rangle / \langle I_{\lambda} \rangle^2; \quad M_3(\lambda) = \langle I_{\lambda}^3 \rangle / \langle I_{\lambda} \rangle^3,$$

где $\langle I_{\lambda} \rangle$ — среднее значение интенсивности для выбранной длины волны.

Анализ экспериментально полученных данных демонстрирует эргодичность и статистическую однородность распределений интенсивности вдоль линии сканирования.

На рис. 3 представлена зависимость статистического момента флуктуаций интенсивности третьего порядка от статистического момента флуктуаций интенсивности второго порядка $M_3(\lambda) = f(M_2(\lambda))$. Полученные немонотонные зависимости демонстрируют степенную зависимость вида:

$$J_2(l_c, \langle \Delta s \rangle) \cong [J_1(l_c, \langle \Delta s \rangle)]^{\gamma},$$

где γ — степень интегрального функционала, которую для рассматриваемой среды можно оценить как $\gamma \approx 3$. Интегральные свертки $J_1(l_c, \langle \Delta s \rangle)$ и $J_2(l_c, \langle \Delta s \rangle)$, связанные с функциями плотности вероятности оптических

длин путей парциальных составляющих флуоресцентного излучения и функцией когерентности излучения, могут быть записаны как:

$$J_1(l_c, \langle \Delta s \rangle) = \int_0^\infty \left| \frac{\sin(\pi \Delta s / l_c)}{\pi \Delta s / l_c} \right|^2 \rho(\Delta s, \langle \Delta s \rangle) d(\Delta s),$$

$$J_2(l_c, \langle \Delta s \rangle) = \left(\int_0^\infty \left| \frac{\sin(\pi \Delta s / l_c)}{\pi \Delta s / l_c} \right| \rho(\Delta s, \langle \Delta s \rangle) d(\Delta s) \right)^3.$$

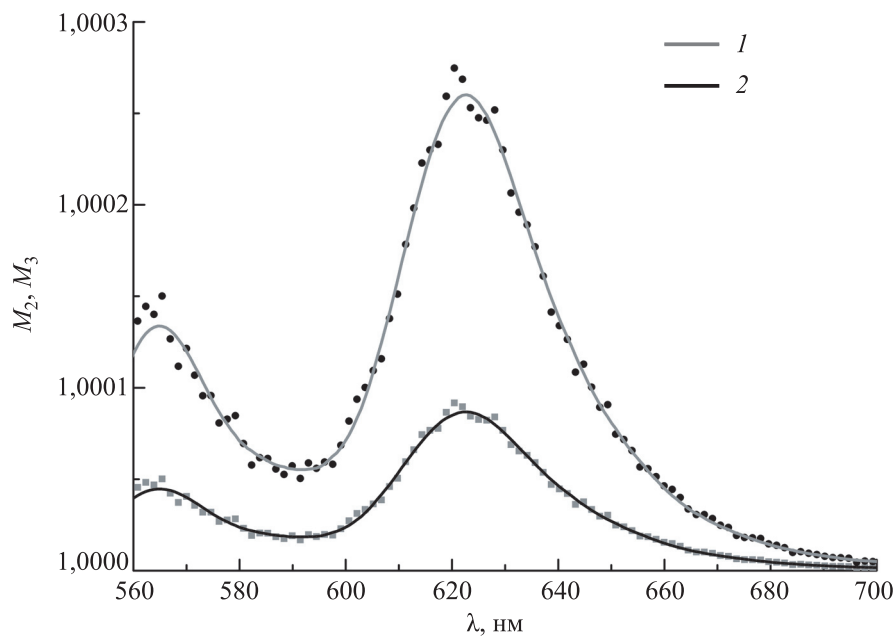


Рис. 2. Зависимости моментов флуктуаций интенсивности флуоресцентного излучения второго (M_2) и третьего порядков (M_3) от длины волны: 1 — M_2 ; 2 — M_3

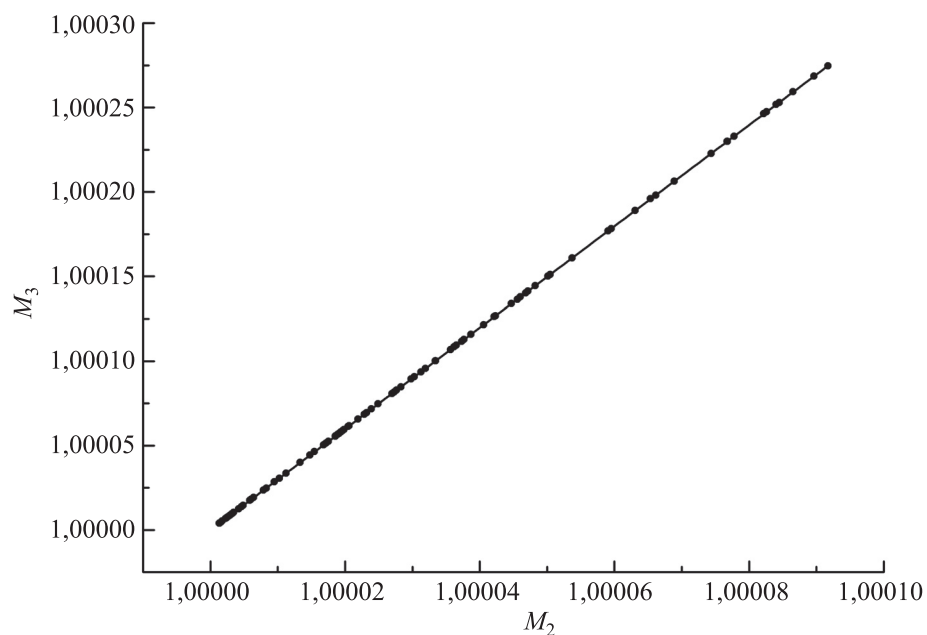


Рис. 3. Зависимость статистического момента флуктуаций интенсивности третьего порядка (M_3) от статистического момента флуктуаций интенсивности второго порядка (M_2)

Заключение

В работе рассмотрен метод исследования флуоресцирующих сильно рассеивающих случайно-неоднородных сред на основе исследования спектральной зависимости моментов второго и третьего порядков флуктуаций интенсивности флуоресцентного излучения.

Универсальная степенная зависимость статистических моментов флуктуаций интенсивности флуоресцентного излучения и моделирование функции плотности вероятности разностей оптических длин путей парциальных составляющих флуоресцентного излучения в среде путем численного решения уравнения переноса излучения с использованием численного метода Монте-Карло позволит использовать подход как метод восстановления оптических транспортных характеристик среды.

Литература

1. Brunel L., Brun A., Snabre P., Cipelletti L. Adaptive speckle imaging interferometry: a new technique for the analysis of microstructure dynamics, drying processes and coating formation // *Optics Express*. 2007. V. 15. N 23. P. 15250–15259. doi: 10.1364/oe.15.015250
2. Zakharov P., Cardinaux F., Scheffold F. Multispeckle diffusing-wave spectroscopy with a single-mode detection scheme // *Physical Review E*. 2006. V. 73. N 1. doi: 10.1103/physreve.73.011413
3. Liu B., Brezinski M.E. Theoretical and practical considerations on detection performance of time domain, Fourier domain, and swept source optical coherence tomography // *Journal of Biomedical Optics*. 2007. V. 12. N 4. doi: 10.1117/1.2753410
4. Van Rossum M.C.W., Nieuwenhuizen Th.M. Multiple scattering of classical waves: microscopy, mesoscopy, and diffusion // *Reviews of Modern Physics*. 1999. V. 71. N 1. P. 313–371. doi: 10.1103/revmodphys.71.313
5. Ushenko A.G. Laser polarimetry of polarization-phase statistical moments of the object field of optically anisotropic scattering layers // *Optics and Spectroscopy*. 2001. V. 91. N 2. P. 313–316. doi: 10.1134/1.1397917
6. Aoki T., Sakurai K. Photon statistics of partially polarized Gaussian light // *Physics Review A*. 1979. V. 20. N 4. P. 1593–1598. doi: 10.1103/physreva.20.1593
7. Bjork G., Soderholm J., Kim Y.-S., Ra Y.-S., Lim H.-T., Kothe C., Kim Y.-H., Sanchez-Soto L.L., Klimov A.B. Central-moment description of polarization for quantum states of light // *Physics Review A*. 2012. V. 85. N 5. doi: 10.1103/physreva.85.053835
8. Bi R., Dong J., Lee K. Multi-channel deep tissue flowmetry based on temporal diffuse speckle contrast analysis // *Optics Express*. 2013. V. 21. N 19. P. 22854–22861. doi: 10.1364/oe.21.022854
9. Zimnyakov D.A., Sina J.S., Yuvchenko S.A., Isaeva E.A., Chekmasov S.P., Ushakova O.V. Low-coherence interferometry as a method for assessing the transport parameters in randomly inhomogeneous media // *Quantum Electronics*. 2014. V. 44. N 1. P. 59–64. doi: 10.1070/qe2014v044n01abeh015292
10. Karamata B., Laubscher M., Leutenegger M., Bourquin S., Lasser T., Lambelet P. Multiple scattering in optical coherence tomography. I. Investigation and modeling // *Journal of the Optical Society of America A*. 2005. V. 22. N 7. P. 1369–1379. doi: 10.1364/josaa.22.001380
11. Zimnyakov D.A., Asharchuk I.A., Yuvchenko S.A., Sviridov A.P. Stochastic interference of fluorescence radiation in random media with large inhomogeneities // *Optics Communication*. 2017. V. 387. P. 121–127. doi: 10.1016/j.optcom.2016.11.045
12. Angelsky O.V., Maksimyak P.P. The investigation of the transformation phenomenon of the longitudinal correlation function of the field propagating in the light scattering medium // *Optics and Spectroscopy*. 1986. V. 60. N 2. P. 331–336.
13. Angelsky O.V., Maksimyak A.P., Maksimyak P.P., Hanson S.G. Optical correlation diagnostics of rough surfaces with large surface inhomogeneities // *Optics Express*. 2006. V. 14. N 16. P. 7299–7311. doi: 10.1364/oe.14.007299
14. Goodman J.W. *Statistical Optics*. Wiley, 2000. 567 p.
15. Nieuwenhuizen T.M., Van Rossum M.C. Intensity distributions of waves transmitted through a multiple scattering medium // *Physical Review Letters*. 1995. V. 74. N 14. P. 2674–2677. doi: 10.1103/physrevlett.74.2674
16. Kogan E., Kaveh M. Random-matrix-theory approach to the intensity distributions of waves propagating in a random medium

References

1. Brunel L., Brun A., Snabre P., Cipelletti L. Adaptive speckle imaging interferometry: a new technique for the analysis of microstructure dynamics, drying processes and coating formation. *Optics Express*, 2007, vol. 15, no. 23, pp. 15250–15259. doi: 10.1364/oe.15.015250
2. Zakharov P., Cardinaux F., Scheffold F. Multispeckle diffusing-wave spectroscopy with a single-mode detection scheme. *Physical Review E*, 2006, vol. 73, no. 1. doi: 10.1103/physreve.73.011413
3. Liu B., Brezinski M.E. Theoretical and practical considerations on detection performance of time domain, Fourier domain, and swept source optical coherence tomography. *Journal of Biomedical Optics*, 2007, vol. 12, no. 4. doi: 10.1117/1.2753410
4. Van Rossum M.C.W., Nieuwenhuizen Th.M. Multiple scattering of classical waves: microscopy, mesoscopy, and diffusion. *Reviews of Modern Physics*. 1999, vol. 71, no. 1, pp. 313–371. doi: 10.1103/revmodphys.71.313
5. Ushenko A.G. Laser polarimetry of polarization-phase statistical moments of the object field of optically anisotropic scattering layers. *Optics and Spectroscopy*, 2001, vol. 91, no. 2, pp. 313–316. doi: 10.1134/1.1397917
6. Aoki T., Sakurai K. Photon statistics of partially polarized Gaussian light. *Physics Review A*, 1979, vol. 20, no. 4, pp. 1593–1598. doi: 10.1103/physreva.20.1593
7. Bjork G., Soderholm J., Kim Y.-S., Ra Y.-S., Lim H.-T., Kothe C., Kim Y.-H., Sanchez-Soto L.L., Klimov A.B. Central-moment description of polarization for quantum states of light. *Physics Review A*, 2012, vol. 85, no. 5. doi: 10.1103/physreva.85.053835
8. Bi R., Dong J., Lee K. Multi-channel deep tissue flowmetry based on temporal diffuse speckle contrast analysis. *Optics Express*, 2013, vol. 21, no. 19, pp. 22854–22861. doi: 10.1364/oe.21.022854
9. Zimnyakov D.A., Sina J.S., Yuvchenko S.A., Isaeva E.A., Chekmasov S.P., Ushakova O.V. Low-coherence interferometry as a method for assessing the transport parameters in randomly inhomogeneous media. *Quantum Electronics*, 2014, vol. 44, no. 1, pp. 59–64. doi: 10.1070/qe2014v044n01abeh015292
10. Karamata B., Laubscher M., Leutenegger M., Bourquin S., Lasser T., Lambelet P. Multiple scattering in optical coherence tomography. I. Investigation and modeling. *Journal of the Optical Society of America A*, 2005, vol. 22, no. 7, pp. 1369–1379. doi: 10.1364/josaa.22.001380
11. Zimnyakov D.A., Asharchuk I.A., Yuvchenko S.A., Sviridov A.P. Stochastic interference of fluorescence radiation in random media with large inhomogeneities. *Optics Communication*, 2017, vol. 387, pp. 121–127. doi: 10.1016/j.optcom.2016.11.045
12. Angelsky O.V., Maksimyak P.P. The investigation of the transformation phenomenon of the longitudinal correlation function of the field propagating in the light scattering medium. *Optics and Spectroscopy*, 1986, vol. 60, no. 2, pp. 331–336.
13. Angelsky O.V., Maksimyak A.P., Maksimyak P.P., Hanson S.G. Optical correlation diagnostics of rough surfaces with large surface inhomogeneities. *Optics Express*, 2006, vol. 14, no. 16, pp. 7299–7311. doi: 10.1364/oe.14.007299
14. Goodman J.W. *Statistical Optics*. Wiley, 2000, 567 p.
15. Nieuwenhuizen T.M., Van Rossum M.C. Intensity distributions of waves transmitted through a multiple scattering medium. *Physical Review Letters*, 1995, vol. 74, no. 14, pp. 2674–2677. doi: 10.1103/physrevlett.74.2674
16. Kogan E., Kaveh M. Random-matrix-theory approach to the intensity distributions of waves propagating in a random medium

- // *Physical Review B*. 1995. V. 52. N 6. P. R3813–R3815. doi: 10.1103/physrevb.52.r3813
17. Thompson C.A., Webb K.J., Weiner A.M. Imaging in scattering media by use of laser speckle // *Journal of the Optical Society of America A*. 1997. V. 14. N 9. P. 2269–2277. doi: 10.1364/josaa.14.002269

Авторы

Исаева Анна Андреевна — кандидат физико-математических наук, доцент, Саратовский государственный технический имени Гагарина Ю.А., Саратов, 410054, Российская Федерация, Scopus ID: 57198204761, ORCID ID: 0000-0002-2925-2733, isanna.1987@mail.ru

Исаева Елена Андреевна — кандидат физико-математических наук, доцент, Саратовский государственный технический имени Гагарина Ю.А., Саратов, 410054, Российская Федерация, Scopus ID: 54884743700, ORCID ID: 0000-0003-0407-312X, 27isaevaea@mail.ru

Ювченко Сергей Алексеевич — кандидат физико-математических наук, доцент, Саратовский государственный технический имени Гагарина Ю.А., Саратов, 410054, Российская Федерация, Scopus ID: 55173628800, ORCID ID: 0000-0001-7863-8600, yuv-sergej@yandex.ru

Зимняков Дмитрий Александрович — доктор физико-математических наук, профессор, Саратовский государственный технический имени Гагарина Ю.А., Саратов, 410054, Российская Федерация, Scopus ID: 7005323820, ORCID ID: 0000-0002-9787-7903, zimnykov@mail.ru

Physical Review B, 1995, vol. 52, no. 6, pp. R3813–R3815. doi: 10.1103/physrevb.52.r3813

17. Thompson C.A., Webb K.J., Weiner A.M. Imaging in scattering media by use of laser speckle. *Journal of the Optical Society of America A*, 1997, vol. 14, no. 9, pp. 2269–2277. doi: 10.1364/josaa.14.002269

Authors

Anna A. Isaeva — PhD, Associate Professor, Yuri Gagarin State Technical University of Saratov (SSTU), Saratov, 410054, Russian Federation, Scopus ID: 57198204761, ORCID ID: 0000-0002-2925-2733, isanna.1987@mail.ru

Elena A. Isaeva — PhD, Associate Professor, Associate Professor, Yuri Gagarin State Technical University of Saratov (SSTU), Saratov, 410054, Russian Federation, Scopus ID: 54884743700, ORCID ID: 0000-0003-0407-312X, 27isaevaea@mail.ru

Sergey A. Yuvchenko — PhD, Associate Professor, Yuri Gagarin State Technical University of Saratov (SSTU), Saratov, 410054, Russian Federation, Scopus ID: 55173628800, ORCID ID: 0000-0001-7863-8600, yuv-sergej@yandex.ru

Dmitry A. Zimnyakov — D.Sc., Full Professor, Yuri Gagarin State Technical University of Saratov (SSTU), Saratov, 410054, Russian Federation, Scopus ID: 7005323820, ORCID ID: 0000-0002-9787-7903, zimnykov@mail.ru