

УДК 535.513

ИССЛЕДОВАНИЕ КОЖНОГО ПОКРОВА МЕТОДОМ ЭЛЛИПСОМЕТРИИ РАССЕЯНИЯ

А.Б. Булыкина^а, В.А. Рыжова^а

^а Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация

Адрес для переписки: a.bulykina@mail.ru

Информация о статье

Поступила в редакцию 29.06.17, принята к печати 21.08.17

doi: 10.17586/2226-1494-2017-17-5-753-760

Язык статьи – русский

Ссылка для цитирования: Булыкина А.Б., Рыжова В.А. Исследование кожного покрова методом эллипсометрии рассеяния // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2017. Т. 17. № 5. С. 753–760. doi: 10.17586/2226-1494-2017-17-5-753-760

Аннотация

Показана возможность применения метода количественной эллипсометрии для исследований оптической анизотропии и структурной неоднородности кожного покрова *in vivo*. Для описания поляризационных свойств деполаризирующей оптически активной среды биоткани использована алгебра матриц Мюллера. На основе сравнительного анализа вариантов технических решений и особенностей их применения в экспериментах с биотканью разработан стенд для регистрации состояния поляризации рассеянного назад излучения. Предложено использовать в оптической схеме стенда излучающий канал эллипсометра ЛЭФ-3 для получения равномерного распределения интенсивности по сечению входного пучка излучения, а также для формирования необходимых для исследования состояний поляризации. Обоснован выбор длины волны источника излучения (He-Ne-лазер, 632 нм) из спектрального диапазона, при котором рассеяние излучения в мутных биологических средах преобладает над поглощением, что дает возможность изменить состояние поляризации выходного излучения, судить о структурных параметрах образца. Разработан приемный канал анализатора состояния поляризации выходного излучения, содержащий видеоинформационный блок на основе цветного матричного сенсора с единым полем анализа для дальнейших многоспектральных исследований поверхностной структуры кожного покрова. Предложена методика эллипсометрического исследования кожи, основанная на визуализации распределения параметров состояния поляризации по сечению пучка выходного излучения и его последующем анализе. Составлен алгоритм и разработано программное обеспечение на объектно-ориентированном языке Python для обработки изображений и расчета поляризационных характеристик образца. Получены распределения поляризационных характеристик для участка кожи, содержащего рубцовые образования, в режиме обратного рассеяния зондирующего лазерного излучения.

Ключевые слова

эллипсометрия рассеяния излучения, биологическая ткань, мутная рассеивающая среда, поляризация, поверхностная структура кожи, исследование кожи *in vivo*, видеоинформационный блок

Благодарности

Работа выполнена в рамках НИР 615868 «Исследование методов и принципов построения автоматизированных видеоинформационных систем для контроля качества продуктов, объектов, материалов».

SKIN RESEARCH BY SCATTERING ELLIPSOMETRY METHOD

A.B. Bulykina^a, V.A. Ryzhova^a

^a ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation

Corresponding author: a.bulykina@mail.ru

Article info

Received 29.06.17, accepted 21.08.17

doi: 10.17586/2226-1494-2017-17-5-753-760

Article in Russian

For citation: Bulykina A.B., Ryzhova V.A. Skin research by scattering ellipsometry method. *Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics*, 2017, vol. 17, no. 5, pp. 753–760 (in Russian). doi: 10.17586/2226-1494-2017-17-5-753-760

Abstract

Application possibility of quantitative ellipsometry method for studies of optical anisotropy and structural heterogeneity of the skin *in vivo* is shown. To describe the polarization properties of the depolarizing optically-active biotissue medium, the Mueller matrix algebra is used. Based on comparative analysis of the technical options and their application in experiments with biotissue, a setup for recording of the polarization state of the backscattered radiation was developed. It is proposed to

use the emitting channel of the LEF-3 ellipsometer in the optical scheme of the stand to have a uniform intensity distribution along the cross section of the input radiation beam, and also to form the polarization states necessary for the study. Radiation source wavelength selection in the spectral range (He-Ne laser, 632 nm) is justified, when scattering of radiation in turbid biological media predominates over absorption that makes it possible to estimate the structural parameters of the sample by the change of the output radiation polarization state. The receiving channel of the output polarization state analyzer was developed; it contains a video information block based on a color matrix sensor with a unified analysis field providing the possibility of further multispectral studying of the skin surface structure. The method of ellipsometric examination of the skin is proposed based on the distribution visualization of the polarization state parameters along the cross section of the output radiation beam and on its following analysis. An algorithm and software are developed with a Python language for image processing and calculation of the polarization characteristics of the sample. The distributions of the polarization characteristics of the skin sector containing scar structures are obtained in the backscattering mode of probing laser radiation.

Keywords

radiation scattering ellipsometry, biological tissue, turbid scattering medium, polarization, skin surface structure, skin study *in vivo*, video information block

Acknowledgements

Research is carried out according to R&D No. 615868 «Research of methods and design concepts of automated video information systems for products, objects and materials quality control»

Введение

В настоящее время одним из активно развивающихся направлений в медицине является обнаружение кожных патологий на ранней стадии развития заболевания [1–15]. Оптические методы диагностики позволяют получать информацию о структуре и составе кожи, изучать процессы, происходящие в биоткани, не оказывая негативного воздействия и не нарушая целостность кожного покрова. Среди них определенными перспективами обладают поляризационные диагностические методы [2–6, 12–15]. Интерес к ним обусловлен высокой чувствительностью поляризационных характеристик рассеянных биологической тканью оптических полей к структурным особенностям и физиологическому статусу объекта исследования. Использование количественной эллипсометрии в мутных средах в ряде случаев позволяет получить качественно новые результаты при исследованиях морфологического и функционального состояния биоткани, представляющих одно из важнейших направлений современной медицинской диагностики [3–6, 10, 13].

В связи с этим для повышения качества выявления кожных образований представляется актуальным развитие теоретических и практических аспектов взаимодействия поляризованного излучения с оптически неоднородными биологическими структурами при решении задач неинвазивного экспресс-контроля состояния объектов медицины.

Научная новизна данной работы заключается в предложенном подходе к определению состояния кожных покровов *in vivo* с помощью системы лазерной эллипсометрии путем исследования влияния анизотропной среды кожи на эволюцию состояния поляризации распространяющегося в ней излучения.

Обзор существующих поляризационных методов исследования кожного покрова

В настоящее время метод, основанный на оценке параметров поляризации зондирующего биоткань излучения, используется в фундаментальных исследованиях и имеет перспективы в ближайшем будущем стать одним из самых информативных методов исследования кожного покрова [7, 12, 16].

Возможности метода поляриметрии при исследовании *in vitro* различных патологий кожи, связанных с развитием заболевания, или других кожных образований, связанных с ее повреждениями, представлены в работах [3–13]. Полученные результаты показывают, что поляризационные параметры прошедшего через исследуемый образец излучения характеризуются различными средними значениями и дисперсией в зависимости от вида кожного образования. Для большинства образований исследуемые образцы могут быть достаточно надежно идентифицированы по нахождению в определенной области в пространстве параметров «азимут поляризации – эксцентриситет эллипса поляризации».

Известны результаты сравнительного анализа здоровой кожи и меланомы, которые показывают, что тонкие срезы образцов проявляют незначительную деполяризацию примерно одинаковой величины [4, 12, 13]. В области судебной медицины проведены исследования установления прижизненного характера повреждений целостности структуры кожного покрова с использованием лазерной поляриметрии [5].

Значительная часть исследований проводится или на имитаторах кожи, сформированных из синтетических материалов [10], или на образцах, изъятых уже после иссечения патологии в ходе операции или методом биопсии [3, 4, 6]. При этом экспресс-исследования *in vitro* на образце, изъятном в результате биопсии, связаны с проведением довольно болезненной процедуры для пациента. В работе [5] авторы также указывают на возникновение динамической погрешности при оценке поляризационных параметров таких образцов с изменением времени.

Таким образом, недостатком ряда исследований [3–13] является использование образца кожи *in vitro*, что сопровождается сложностью поддержания его структурно-динамических параметров и не все-

гда позволяет получить достоверную информацию о поляризационных свойствах живой биоткани. В связи с этим целесообразно рассмотреть возможность организации экспериментального исследования живой ткани.

Определенный интерес при проведении исследований биоткани *in vivo* представляет схема детектирования монохроматического излучения, рассеянного под углом к исследуемой поверхности. Данная схема измерений с практической точки зрения более проста в реализации по сравнению со случаем детектирования излучения, отраженного по нормали к поверхности образца [2, 4], позволяет выделить вклад объемной рассеянной составляющей и уменьшить вклад поверхностного отражения [8, 9, 13].

Целью работы является разработка стенда для диагностики кожных образований *in vivo* методом эллипсометрии рассеянного излучения и исследование поверхностных слоев кожного покрова.

Теоретические аспекты исследования

Методы поляриметрии основаны на исследовании поляризационной структуры поля излучения, рассеянного объектом. Особенностью такого подхода является учет векторной структуры поля рассеянного света за счет измерения параметров анизотропии (линейный и циркулярный дихроизм) оптически активных биологических структур [14].

Для описания прохождения поляризованного излучения через среду используются методы на основе координатно-матричных представлений. Поскольку образец кожи рассматривается как оптически мутная деполаризующая среда, к описанию его свойств применима алгебра матриц Мюллера [7, 12]. Характеристики биоткани связаны с параметрами поляризованного излучения следующим образом:

$$\mathbf{S}_{out} = \mathbf{M} \times \mathbf{S}_{int}, \quad (1)$$

где \mathbf{S}_{int} и \mathbf{S}_{out} – векторы Стокса, содержащие информацию о состоянии поляризации входного и выходного излучения соответственно; \mathbf{M} – совокупная матрица образца.

Обобщенный метод поляриметрического анализа мутных рассеивающих сред базируется на разложении совокупной матрицы Мюллера и состоит в том, чтобы изолировать и количественно оценить каждый поляризационный эффект отдельно. Для этого матрица Мюллера из выражения (1) раскладывается на произведение трех «базисных» матриц [1, 14]:

$$\mathbf{M} = \mathbf{M}_\Delta \cdot \mathbf{M}_R \cdot \mathbf{M}_D, \quad (2)$$

где матрица \mathbf{M}_Δ рассматривается для деполаризующих эффектов среды, матрица \mathbf{M}_R описывает эффекты линейного двулучепреломления и оптической активности, матрица \mathbf{M}_D включает эффекты линейного и циркулярного дихроизма.

Определение векторов Стокса входного и выходного излучения позволяет решить матричное уравнение (1) и определить далее методом декомпозиции составляющие матрицы Мюллера исследуемой среды (2).

Параметры вектора Стокса принято выражать через интенсивности компонент, на которые может быть разложена электромагнитная волна [16, 17]:

$$\mathbf{S} = \begin{bmatrix} S_1 \\ S_2 \\ S_3 \\ S_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} I_x + I_y \\ I_x - I_y \\ I_{+45^\circ} + I_{-45^\circ} \\ I_r + I_l \end{bmatrix}, \quad (3)$$

где S_1, S_2, S_3, S_4 – четыре параметра вектора Стокса для описания состояния поляризации электромагнитной волны; $I_x, I_y, I_{+45^\circ}, I_{-45^\circ}, I_r, I_l$ – интенсивности волны, прошедшей через идеальный поляризатор, расположенный на пути этой волны и пропускающий излучения с азимутами $0^\circ, 90^\circ, +45^\circ, -45^\circ$, а также право- и левоциркулярно поляризованное излучение соответственно.

Параметры вектора Стокса связаны с состоянием поляризации прошедшего образец излучения (азимут a , углом эллиптичности эллипса поляризации β и степенью поляризации P) следующим образом:

$$a = \frac{1}{2} \arctan \frac{S_3}{S_2}, \quad \beta = \frac{1}{2} \arcsin \left[\frac{S_4}{\sqrt{S_2^2 + S_3^2 + S_4^2}} \right], \quad P = \frac{\sqrt{S_2^2 + S_3^2 + S_4^2}}{S_1}. \quad (4)$$

При этом вектор Стокса для частично-поляризованного излучения можно представить в виде $\mathbf{S} = I \{1, P \cos 2\beta \cos 2a, P \cos 2\beta \sin 2a, P \sin 2\beta\}$.

Таким образом, определив экспериментальным путем интенсивности компонент частично-поляризованного излучения и рассчитав параметры состояния поляризации на выходе образца кожи, можно сформировать полный вектор Стокса для дальнейшего решения задачи определения матрицы Мюллера объекта исследования.

Постановка экспериментального исследования

Объектом исследования является участок кожи, содержащий атрофический рубец. Задача эксперимента – выявить на здоровой коже наличие рубцовой ткани поляризационным методом.

В рассмотренных работах не приводятся данные о поляризационных параметрах рубцовых тканей, однако их изучение имеет большую практическую значимость для разработки методов их лечения.

Глубина проникновения излучения в биоткань зависит от его длины волны. Экспериментально доказано, что проникающая способность излучения от ближней ультрафиолетовой области до оранжевого спектра увеличивается от 1–20 мкм до 2,5 мм [1, 7, 10, 14]. Глубина проникновения резко увеличивается в красном диапазоне видимого спектра и составляет 20–30 мм. Пик проникающей способности приходится на ближний инфракрасный диапазон (до 70 мкм при $\lambda=0,95$ мкм).

Максимум пропускания оптического излучения кожей находится в диапазоне 0,8–1,2 мкм. В диапазоне 0,6–1,4 мкм кожный покров поглощает примерно 30–40% падающего излучения. Это обусловлено спектрами поглощения основных хромофоров кожного покрова, которые представлены на рис. 1 [14].

Следует отметить, что при проникновении инфракрасного излучения на несколько сантиметров вглубь возникает сильное рассеяние. Рассеяние затрудняет получение четких изображений оптических неоднородностей, возникающих в ткани из-за различных патологий, к примеру, образования опухоли, локального увеличения объема крови из-за кровоизлияния или разрастания микрососудов [7, 12, 13]. На рис. 1 видно, что существует диагностическое окно, в котором излучение рассеивается не полностью. Границы диагностического окна расположены от 0,6 мкм до 1,2 мкм и практически совпадают с максимумом пропускания кожного покрова.

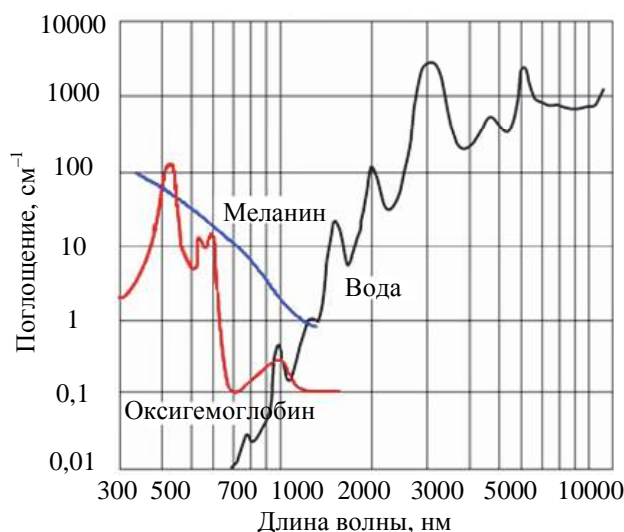


Рис. 1. Спектр поглощения основных хромофоров кожного покрова в видимом и инфракрасном диапазонах

В экспериментальной установке предлагается использовать в качестве источника излучения лазер с длиной волны, находящейся в пределах диагностического окна кожного покрова. Преимуществом лазера по сравнению с ламповыми источниками излучения является монохроматичность генерируемого света и малая расходимость пучка излучения. В качестве источника излучения выбран He-Ne-лазер ($\lambda=0,632$ мкм, мощность 1 мВт) марки ЛГН-207Б. Данный лазер традиционно используется в медицинских целях – в хирургии, для биостимуляции и исследования биотканей.

В качестве приемника оптического излучения предлагается использовать многоэлементный сенсор с единым полем анализа, который позволяет получить распределения интенсивностей компонент прошедшего образца излучения в поперечном сечении пучка. Детектирование и обработка данных производится с помощью видеоинформационного блока на основе цветной мегапиксельной камеры VEC-545-USB. Светочувствительным элементом камеры является КМОП-матрица OV5620 производства фирмы OmniVision. Область спектральной чувствительности сенсора расположена в диапазоне 0,4–1,2 мкм и совпадает с диагностическим окном кожного покрова.

Использование в приемном канале цветной камеры позволит проводить в дальнейшем мультиспектральное исследование кожи.

Таким образом, для исследования кожных покровов *in vivo* сформирован стенд на базе излучающего канала (канала поляризатора) эллипсометра ЛЭФ-3, содержащего в качестве источника излучения лазер ЛГН-207Б. Для получения распределений компонент интенсивности волны по сечению рассеянного кожей пучка используется приемный видеоинформационный канал (канал анализатора). Канал анализа-

тора стенда содержит оптические анизотропные элементы поляризационных фильтров для выделения шести компонент прошедшего образец излучения.

На рис. 2 схематично представлен стенд для исследования кожного покрова.

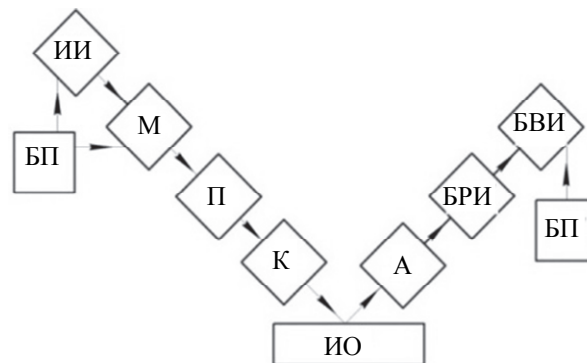


Рис. 2. Структурная схема стенда для исследования кожи: БП – блок питания; ИИ – источник излучения; М – оптико-механический модулятор; П – поляризатор; К – компенсатор; ИО – исследуемый образец; А – анализатор; БРИ – блок регистрации изображения; БВИ – блок визуализации изображения

Эксперимент проводится при комнатной температуре в затемненном помещении для уменьшения засветки матричного приемника. Угол падения на образец входного линейно-поляризованного излучения для определенности устанавливается 45° .

Изображение исследуемого образца кожи с атрофическим рубцом представлено на рис. 3. Масштабная сетка позволяет получить представление о размерах области интереса (обозначена белым цветом), содержащей проблемный участок кожи. Бледный цвет атрофического рубца обусловлен меньшим содержанием меланоцитов, чем у здоровой кожи, а также упорядоченным расположением волокон коллагена и их незначительным количеством [14].

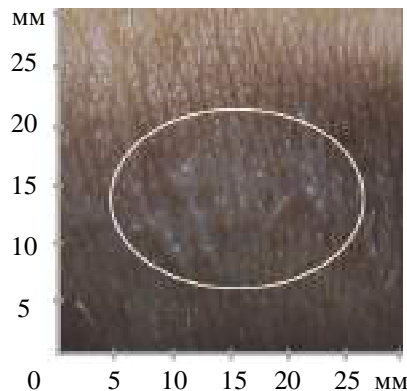


Рис. 3. Изображение участка кожи с атрофическим рубцом

На чувствительной площадке фотоприемника последовательно формируются поляризационные изображения проблемного участка кожи, содержащего рубцовую ткань. В результате их обработки составляется набор из 6 двумерных массивов данных, соответствующих распределениям интенсивности рассеянного образцом излучения на площадке многоэлементного приемника при различных положениях поляризационного фильтра канала анализатора.

Далее файлы обрабатываются с помощью скрипта, составленного на языке Python 2.7. Программа считывает файлы из папки и вычисляет параметры вектора Стокса и состояния поляризации излучения на выходе объекта исследования для каждого пикселя изображения согласно выражениям (3) и (4).

Результаты экспериментального исследования

В результате экспериментального исследования получены диаграммы распределения поляризационных параметров излучения на выходе участка кожи, содержащей рубцовое образование. Распределения параметров вектора Стокса излучения в области атрофического рубца показаны на рис. 4.

На рис. 5 представлены распределения параметров состояния поляризации в области поврежденной ткани.

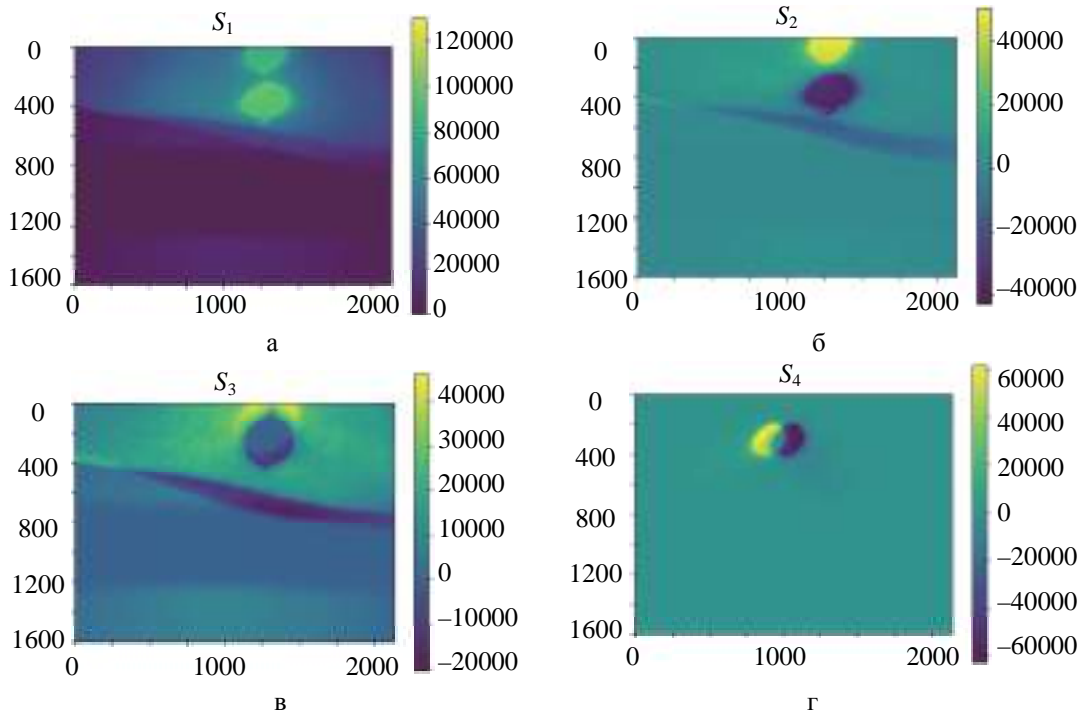


Рис. 4. Распределения параметров Стокса в области атрофического рубца при разных положениях поляризационных фильтров: согласованное положение поляризатора и анализатора (а); скрещенное положение поляризатора и анализатора (б); оси пропускания поляризатора и анализатора расположены под углом (+45° или -45°) (в); положение осей аналогично, и присутствует фазовая пластинка (г)

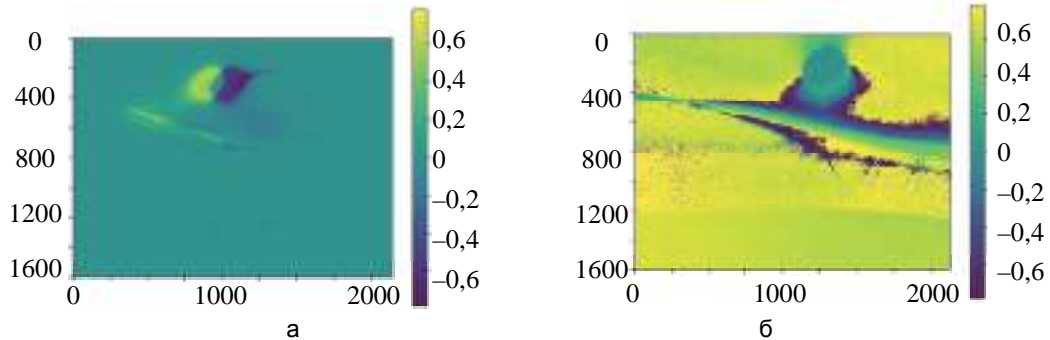


Рис. 5. Распределение параметров состояния поляризации в области атрофического рубца: угол эллиптичности эллипса поляризации (а); азимут поляризации (б)

На рис. 4 и 5 числа по осям координат соответствуют количеству пикселей матричного сенсора, указывают на расположение образца в кадре и не несут иной информационной нагрузки. Исследуемый рубец находится в области кружка рассеяния. Изображение на диаграммах клиновидного участка находится вне области анализа.

Из рис. 4 видно, что параметр S_1 соответствует полной интенсивности излучения и всегда положителен (рис. 4, а). Параметр S_2 имеет максимальное значение для выходного линейно-поляризованного излучения с азимутом $a = 0^\circ$, а при азимуте $a = 90^\circ$ параметр принимает наибольшее по модулю отрицательное значение (рис. 4, б). Положительный параметр S_3 указывает на то, что волна поляризована преимущественно с азимутом $a=45^\circ$, а если параметр S_3 отрицателен, то волна поляризована преимущественно с азимутом $a = -45^\circ$ (рис. 4, в). Параметр S_4 положителен (отрицателен) или равен нулю при преобладании правой (левой) циркулярной компоненты или при их равенстве (рис. 4, г).

Расчеты позволяют определить ориентировочный диапазон изменения степени поляризации выходного излучения от 0,03 до 0,15. Изменения угла эллиптичности находятся в диапазоне от -0,4 до -0,3 (рис. 5, а). Изображение распределения азимута поляризации в области рубца имеет ярко выраженные участки отрицательных и нулевых значений. Значения азимута поляризации в интервале от 0 до -0,2 соответствуют расположению рубцовой ткани. Положительные значения азимута поляризации соответствуют здоровым участкам кожи (рис. 5, б).

Сложность интерпретации результатов связана в первую очередь со смещениями по площадке сенсора изображения пятна рассеяния, фиксируемого в разных кадрах. Указанное смещение вызвано вариациями угла падения излучения из-за произвольной формы и нестабильности пространственного положения поверхности образца во время эксперимента.

Заключение

В работе использован метод эллипсометрии рассеяния для исследования *in vivo* кожных образований. Обоснован выбор координатно-матричного метода Мюллера для описания анизотропных свойств деполяризующей среды биоткани. Сформирован экспериментальный видеоинформационный стенд, получены распределения поляризационных характеристик прошедшего образец излучения в поперечном сечении пучка обратно рассеянного кожей с атрофическим рубцом. Показана возможность выявить количественные отличия здоровой ткани от поврежденной по относительным изменениям поляризационных характеристик. Для получения корректных данных для количественного анализа состояния кожи необходима дополнительная программная обработка изображений проблемного участка для их совмещения при сложении и вычитании. Последующая оценка чувствительности метода позволит принять решение о существенности аномальных изменений на фоне здоровой кожи.

Литература

1. Tuchin V.V. *Tissue Optics: Light Scattering Methods and Instruments for Medical Diagnosis*. 2nd ed. Bellingham: SPIE Press, 2007. V. 13. 825 p.
2. Jacques S.L., Ramella-Roman J.C., Lee K. Imaging skin pathology with polarized light // *Journal of Biomedical Optics*. 2002. V. 7. N 3. P. 329–340. doi: 10.1117/1.1484498
3. Утц С.Р., Решетникова Е.М., Алонова М.В. и др. Поляриметрический анализ сульфакрилатных отрывов эпидермиса как метод оптической биопсии // *Саратовский научно-медицинский журнал*. 2013. Т. 9. № 3. С. 540–543.
4. Ровира Р.У., Тужанский С.Э., Савенков С.М., Павлов С.В. и др. Метод и поляриметрическая система локальной дифференциации патологий анизотропных биотканей // *Physics and Engineering in Photobiology and Photomedicine*. 2014. Т. 3. № 4. С. 112–120.
5. Бачинский В.Т. Перспективы применения лазерно-поляриметрических методов исследования биологических тканей в судебной медицине // *Судебная медицина*. 2016. Т. 2. № 3. С. 4–8. doi: 10.19048/2411-8729-2016-2-3--1
6. Altamura D. et al. Dermatoscopy of basal cell carcinoma: morphologic variability of global and local features and accuracy of diagnosis // *Journal of the American Academy of Dermatology*. 2010. V. 62. N 1. P. 67–75. doi: 10.1016/j.jaad.2009.05.035
7. Savenkov S.N. Mueller-matrix characterization of biological tissues // *NATO Science for Peace and Security Series C: Environmental Security*. 2011. P. 437–472. doi: 10.1007/978-94-007-1636-0_17
8. Du E., He H., Zen N. et al. Mueller matrix polarimetry for differentiating characteristic features of cancerous tissues // *Journal of Biomedical Optics*. 2014. V. 19. N 7. P. 076013. doi: 10.1117/1.jbo.19.7.076013
9. Ghassemi P., Miranbaygi M.H. Towards skin polarization characterization using polarimetric technique // *Journal of Zhejiang University Science B*. 2009. V. 10. N 8. P. 602–608. doi: 10.1631/jzus.b0920068
10. Sviridov A., Chernomordik V., Hassan M. et al. Intensity profiles of linearly polarized light backscattered from skin and tissue-like phantoms // *Journal of Biomedical Optics*. 2005. V. 10. N 1. P. 014012. doi: 10.1117/1.1854677
11. Batisse D., Bazin R., Baldeweck T. Influence of age on the wrinkling capacities of skin // *Skin Research and Technology*. 2002. V. 8. N 3. P. 148–154. doi: 10.1034/j.1600-0846.2002.10308.x
12. Ghosh N. et al. Mueller matrix decomposition for polarized light assessment of biological tissues // *Journal of Biophotonics*. 2009. V. 2. N 3. P. 145–156. doi: 10.1002/jbio.200810040
13. Yu-Da Chen et. al. Study of biological reaction in cancer cell with spectroscopic imaging ellipsometry // *Nanoimaging and Nanospectroscopy IV*. 2016. V. 9925. doi:

References

1. Tuchin V.V. *Tissue Optics: Light Scattering Methods and Instruments for Medical Diagnosis*. 2nd ed. Bellingham, SPIE Press, 2007, vol. 13, 825 p.
2. Jacques S.L., Ramella-Roman J.C., Lee K. Imaging skin pathology with polarized light. *Journal of Biomedical Optics*, 2002, vol. 7, no. 3, pp. 329–340. doi: 10.1117/1.1484498
3. Utts S.R., Reshetnikova E.M., Alonova M.V. et. al. Polarimetric sulfacrilate epidermal strippings analysis as a method of optical biopsy. *Saratov Journal of Medical Scientific Research*, 2013, vol. 9, no. 3, pp. 540–543. (In Russian).
4. Rovira R.U., Tuzhan'skii S.E., Savenkov S.M., Pavlov S.V. et. al. Method and polarimetric system for local differentiation of pathologies in anisotropic biotissue. *Physics and Engineering in Photobiology and Photomedicine*, 2014, vol. 3, no. 4, pp. 112–120. (In Russian).
5. Bachinskiy V.T. Perspectives of laser-polarimetric methods of biological tissue investigation in forensic medicine. *Russian Journal of Forensic Medicine*, 2016, vol. 2, no. 3, pp. 4–8. (In Russian). doi: 10.19048/2411-8729-2016-2-3--1
6. Altamura D. et al. Dermatoscopy of basal cell carcinoma: morphologic variability of global and local features and accuracy of diagnosis. *Journal of the American Academy of Dermatology*, 2010, vol. 62, no. 1, pp. 67–75. doi: 10.1016/j.jaad.2009.05.035
7. Savenkov S.N. Mueller-matrix characterization of biological tissues. *NATO Science for Peace and Security Series C: Environmental Security*, 2011, pp. 437–472. doi: 10.1007/978-94-007-1636-0_17
8. Du E., He H., Zen N. et al. Mueller matrix polarimetry for differentiating characteristic features of cancerous tissues. *Journal of Biomedical Optics*, 2014, vol. 19, no. 7, pp. 076013. doi: 10.1117/1.jbo.19.7.076013
9. Ghassemi P., Miranbaygi M.H. Towards skin polarization characterization using polarimetric technique. *Journal of Zhejiang University Science B*, 2009, vol. 10, no. 8, pp. 602–608. doi: 10.1631/jzus.b0920068
10. Sviridov A., Chernomordik V., Hassan M. et al. Intensity profiles of linearly polarized light backscattered from skin and tissue-like phantoms. *Journal of Biomedical Optics*, 2005, vol. 10, no. 1, pp. 014012. doi: 10.1117/1.1854677
11. Batisse D., Bazin R., Baldeweck T. Influence of age on the wrinkling capacities of skin. *Skin Research and Technology*, 2002, vol. 8, no. 3, pp. 148–154. doi: 10.1034/j.1600-0846.2002.10308.x
12. Ghosh N. et al. Mueller matrix decomposition for polarized light assessment of biological tissues. *Journal of Biophotonics*, 2009, vol. 2, no. 3, pp. 145–156. doi: 10.1002/jbio.200810040

- 10.1117/12.2236288
14. Anderson R.R., Parrish J.A. Optical properties of human skin // *The Science of Photomedicine*. 1982. P. 147–194. doi: 10.1007/978-1-4684-8312-3_6
 15. Simpson C.L., Patel D.M., Green K.J. Deconstructing the skin: cytoarchitectural determinants of epidermal morphogenesis // *Nature Reviews Molecular Cell Biology*. 2011. V. 12. N 9. P. 565–580. doi: 10.1038/nrm3175
 16. Spivak A.V., Druzhina O.A., Sinichkin Yu.P., Yakovlev D.A. Single-polarizer method for measurement of polarization characteristics of incoherent backscattering from anisotropic media // *Proc. SPIE*. 2007. V. 6535. P. 653601. doi: 10.1117/12.753453
 17. Ghosh N., Soni J., Wood M.F.G., Wallenberg M.A., Vitkin I.A. Mueller matrix polarimetry for the characterization of complex random medium like biological tissues // *Pramana*. 2010. V. 75. N 6. P. 1071–1086. doi: 10.1007/s12043-010-0191-8
 13. Yu-Da Chen et. al. Study of biological reaction in cancer cell with spectroscopic imaging ellipsometry. *Nanoimaging and Nanospectroscopy IV*, 2016, vol. 9925. doi: 10.1117/12.2236288
 14. Anderson R.R., Parrish J.A. Optical properties of human skin. *The Science of Photomedicine*, 1982, pp. 147–194. doi: 10.1007/978-1-4684-8312-3_6
 15. Simpson C.L., Patel D.M., Green K.J. Deconstructing the skin: cytoarchitectural determinants of epidermal morphogenesis. *Nature Reviews Molecular Cell Biology*, 2011, vol. 12, no. 9, pp. 565–580. doi: 10.1038/nrm3175
 16. Spivak A.V., Druzhina O.A., Sinichkin Yu.P., Yakovlev D.A. Single-polarizer method for measurement of polarization characteristics of incoherent backscattering from anisotropic media. *Proc. SPIE*, 2007, vol. 6535, pp. 653601. doi: 10.1117/12.753453
 17. Ghosh N., Soni J., Wood M.F.G., Wallenberg M.A., Vitkin I.A. Mueller matrix polarimetry for the characterization of complex random medium like biological tissues. *Pramana*, 2010, vol. 75, no. 6, pp. 1071–1086. doi: 10.1007/s12043-010-0191-8

Авторы

Булыкина Анастасия Борисовна – инженер, Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация, a.bulykina@mail.ru

Рыжова Виктория Александровна – кандидат технических наук, доцент, Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация, victoria_ryz@mail.ru

Authors

Anastasiya B. Bulykina – engineer, ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation, a.bulykina@mail.ru

Victoria A. Ryzhova – PhD, Associate Professor, ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation, victoria_ryz@mail.ru