
ОПТИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ КОНТРОЛЯ

УДК 681.787

М. А. ВОЛЫНСКИЙ, Е. А. ВОРОБЬЕВА, И. П. ГУРОВ, Н. Б. МАРГАРЯНЦ

БЕСКОНТАКТНЫЙ КОНТРОЛЬ МИКРООБЪЕКТОВ МЕТОДАМИ ИНТЕРФЕРОМЕТРИИ МАЛОЙ КОГЕРЕНТНОСТИ И ОПТИЧЕСКОЙ КОГЕРЕНТНОЙ ТОМОГРАФИИ

Рассмотрены основные характеристики методов интерферометрии малой когерентности и оптической когерентной томографии применительно к задачам исследований микрорельефа поверхности и внутренней микроструктуры различных материалов с высокой разрешающей способностью. Представлены примеры практического использования рассмотренных методов при исследовании рельефа поверхности полимерного материала, внутренней микроструктуры материала бумаги и микроструктуры лакового слоя при оценке состояния предметов живописи для последующей реставрации с применением лазерных технологий.

Ключевые слова: бесконтактный контроль, микрообъекты, методы интерферометрии малой когерентности, оптическая когерентная томография.

Введение. Лазерные технологии широко используются для обработки и модификации поверхности различных материалов. При этом важное значение имеют методы диагностики характеристик материала до и после обработки с требуемыми разрешающей способностью и быстродействием.

В ряде случаев необходимо контролировать отклонения рельефа поверхности с разрешающей способностью в единицы микрометров при диапазоне отклонений до нескольких миллиметров. Для решения этой задачи возможно использовать бесконтактные методы интерферометрии малой когерентности, или интерферометрические радары [1, 2].

Для контроля внутренней микроструктуры частично прозрачных материалов, слоистых и случайно-неоднородных сред широко используются методы оптической когерентной томографии (ОКТ), основанные на принципах интерферометрии малой когерентности, применительно к рассеивающим излучение неоднородным средам (см., например, [3—5]).

При помощи интерферометрических радаров и оптических когерентных томографов проводят исследования материалов неорганической и органической природы, модифицированных под воздействием лазерного излучения [6], свойств биологических объектов [3—5], состояния ценных предметов искусства [7].

В статье рассмотрены основные характеристики методов интерферометрии малой когерентности и представлены примеры применения интерферометрических радаров и томографов для бесконтактной диагностики различных объектов.

Методы интерферометрии малой когерентности и оптической когерентной томографии. Принцип построения интерферометрических радаров и систем ОКТ основывается на формировании измерительной волны E_1 , взаимодействующей с исследуемым объектом, и

опорной волны E_2 при последующем сложении и квадратичном детектировании суммы двух волн $E = E_1 + E_2$ (рис. 1). При этом возможно использовать различные методы формирования и регистрации интерферометрических сигналов.

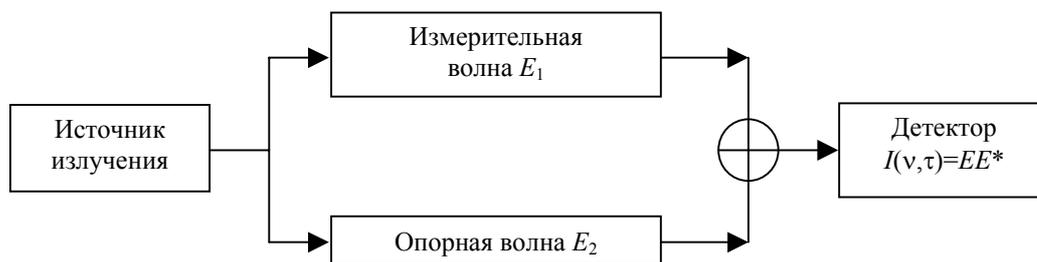


Рис. 1

На рис. 2 представлены упрощенные схемы интерферометров малой когерентности.

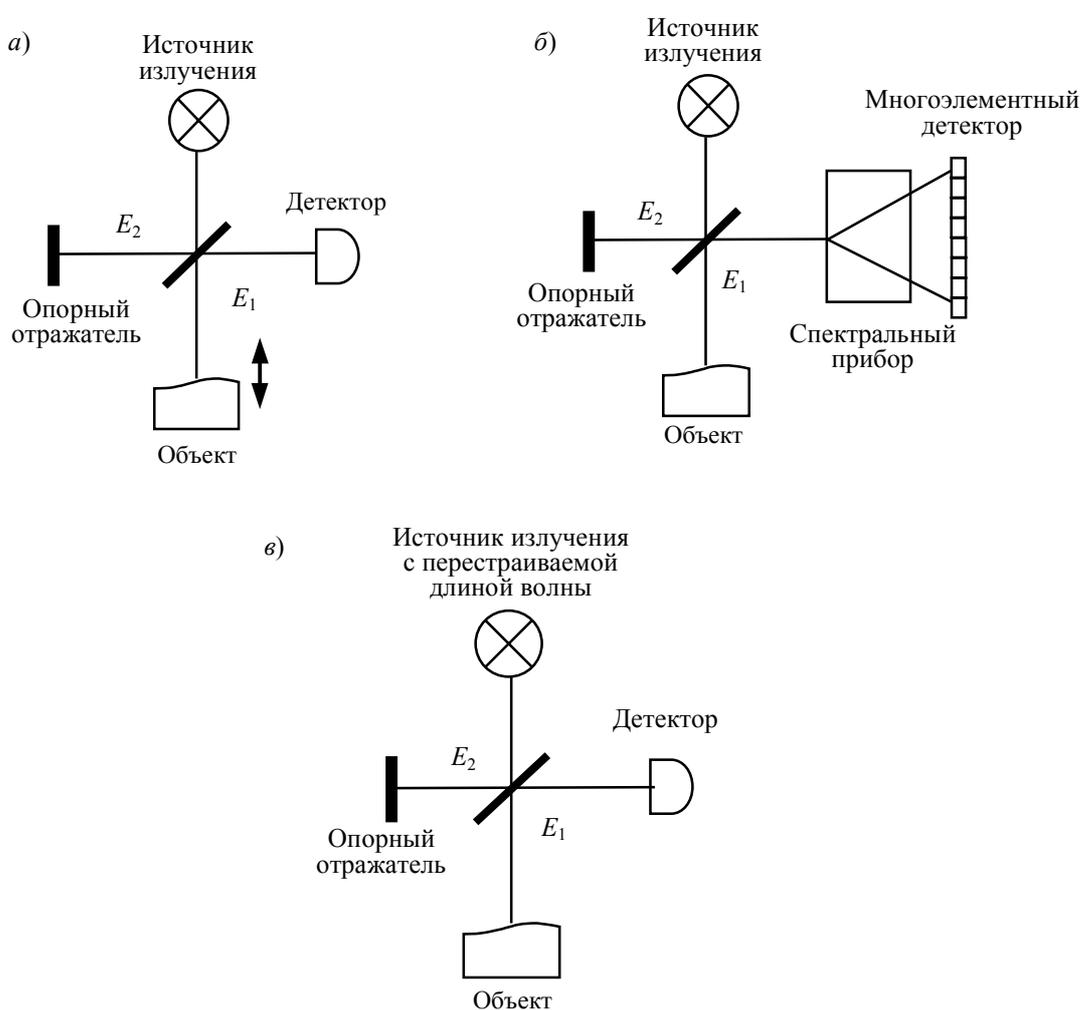


Рис. 2

В корреляционном интерферометре (рис. 2, а) осуществляют перемещение оптической системы относительно исследуемого объекта. При этом интерференционные полосы малой когерентности формируются в пределах длины когерентности излучения при интерференции части измерительной волны, отраженной от поверхности непрозрачного объекта или от слоя частично прозрачного неоднородного объекта, находящихся от светоделителя на расстоянии, равном оптической длине пути опорной волны.

В спектральном интерферометре (рис. 2, б) оптическая длина пути опорной волны не равна оптической длине пути измерительной волны для всего диапазона высот рельефа непрозрачного объекта или глубины частично прозрачного объекта. На выходе интерферометра размещен спектральный прибор, позволяющий определить составляющую отраженной измерительной волны для различных длин волн. При этом, используя преобразование Фурье спектра, зарегистрированного многоэлементным фотодетектором, можно определить расстояние и степень отражения от каждого слоя.

В случае использования источника когерентного излучения с перестраиваемой длиной волны (рис. 2, в) разделение по длинам волн осуществляется во временной области вместо разделения в пространственной области (рис. 2, б).

Детально методы корреляционной и спектральной ОКТ исследованы в работе [8]. Рассмотрим основные особенности формирования и анализа сигналов в корреляционной и спектральной ОКТ.

Обозначим значения напряженности электрического поля измерительной и опорной волн в интерферометре как

$$E_1(v, t) = rE_0(v, t)H(v), \quad (1)$$

$$E_2(v, t, \tau) = (1 - r)E_0(v, t) \exp(-j2\pi v\tau), \quad (2)$$

где v — частота оптических колебаний, r — амплитудный коэффициент отражения в светоделителе, $E_0(v, t) = A(v) \exp(-j2\pi vt)$ — оптические колебания источника излучения с амплитудным спектром $A(v)$, $H(v)$ — комплексная частотная характеристика исследуемого образца, $\tau = \Delta/c$ — интервал времени сдвига измерительной волны по отношению к опорной при оптической разности хода $\Delta = 2z$, c — скорость света, z — координата по глубине исследуемой среды.

Интенсивность излучения, регистрируемого на выходе интерферометра, определяется выражением

$$I(v, \tau) = \langle (E_1 + E_2)(E_1 + E_2)^* \rangle = |E_1|^2 + |E_2|^2 + 2 \operatorname{Re} \langle E_1 E_2^* \rangle. \quad (3)$$

Здесь угловые скобки обозначают усреднение во времени. Принимая интервал усреднения много большим периода световых колебаний и $\kappa = 0,5$, из соотношений (1)—(3) получим

$$I(v, \tau) = \frac{1}{4} G(v) |H(v)|^2 + \frac{1}{4} G(v) + \frac{1}{2} G(v) \operatorname{Re} \{ H(v) \exp(-j2\pi v\tau) \}, \quad (4)$$

где $G(v)$ — спектральная плотность мощности излучения источника. Первое слагаемое в (4) описывает эффект фильтрации спектральной плотности мощности исходного излучения при взаимодействии с исследуемым образцом. При отсутствии спектрального поглощения в образце $|H(v)|^2 = 1$. Второе слагаемое соответствует спектральной плотности мощности излучения, отраженного в опорной ветви интерферометра. Третье слагаемое интерпретируется в зависимости от используемого метода формирования интерферометрических сигналов.

В корреляционном интерферометре это слагаемое характеризует интерференционные полосы при изменении времени задержки τ , в спектральном — формирование спектра равного хроматического порядка в частотной области v при фиксированном значении $\tau = \tau_j$ для каждого j -го слоя.

В корреляционном интерферометре все спектральные составляющие некогерентно суммируются, и результирующая интенсивность зависит только от времени задержки τ , а именно

$$I(\tau) = \int_{-\infty}^{\infty} I(\nu, \tau) d\nu = \frac{1}{4} I_0 [1 + 2 \operatorname{Re}\{V(\tau)\}], \quad (5)$$

где

$$I_0 = \int_{-\infty}^{\infty} G(\nu) [1 + |H(\nu)|^2] d\nu, \quad (6)$$

$$V(\tau) = \int_{-\infty}^{\infty} G(\nu) H(\nu) \exp(-j2\pi\nu\tau) d\nu. \quad (7)$$

Выражение (7) представляет собой преобразование Фурье от произведения двух функций. В соответствии с известной теоремой о свертке с учетом взаимосвязи спектральной плотности мощности и корреляционной функции стационарных эргодических случайных процессов (теоремы Винера—Хинчина) это выражение можно представить для области независимой переменной в форме интеграла свертки

$$V(t) = 2 \int_0^{\infty} R(\tau) h(t - \tau) d\tau, \quad (8)$$

где $R(\tau)$ — автокорреляционная функция излучения источника.

Соотношение

$$h(t) = \int_{-\infty}^{\infty} H(\nu) \exp(j2\pi\nu t) d\nu \quad (9)$$

можно интерпретировать как импульсный отклик исследуемого образца при освещении излучением в виде δ -импульса.

Из (8) следует, что при использовании излучения с широким спектром (подобного некоррелированному шуму) и узкой автокорреляционной функцией $R(\tau)$ функция видности интерференционных полос $V(t)$ характеризует отклик исследуемого образца, $V(t) \cong h(t)$, а значит и его внутреннюю структуру, с высокой разрешающей способностью.

В спектральном интерферометре составляющие интенсивности (4) детектируются независимо на различных длинах волн за счет использования спектрального прибора и отдельных фотодетекторов для каждого выделяемого прибором спектрального интервала (см. рис. 2, б) либо за счет разделения сигналов спектральных составляющих во времени при использовании источника излучения с перестраиваемой длиной волны (см. рис. 2, в). При этом выражение (4) принимает вид

$$I(\nu, \tau) = \frac{1}{4} G(\nu) |H(\nu)|^2 + \frac{1}{4} G(\nu) + \frac{1}{2} G(\nu) \operatorname{Re}\{H(\nu) \exp(-j2\pi\nu\tau)\}. \quad (10)$$

При $\tau = 0$ соотношение (10) аналогично выражению (7).

Проведенное выше рассмотрение методов формирования и регистрации интерферометрических сигналов в ОКТ позволяет сравнить их основные характеристики (см. таблицу).

Метод ОКТ	Разрешающая способность	Быстродействие	Основное преимущество
Корреляционный	Высокая	Ограниченное	Возможность фокусировки на каждом отдельном слое
Спектральный	Средняя	Повышенное	Не требуется механическое перемещение элементов устройства
Спектральный с перестраиваемой длиной волны	Средняя	Высокое	Возможность получения информации по всей площади исследуемого участка при использовании матрицы фотодетекторов

С помощью корреляционной ОКТ осуществляется послойное сканирование объекта по глубине, что позволяет обеспечить фокусировку зондирующего пучка в пределах длины когерентности излучения с использованием объектива с увеличенной апертурой и получить высокую разрешающую способность до 1 мкм по трем координатам (см., например, [9]). Однако послойное сканирование ограничивает быстродействие, главным образом за счет ограниченной пропускной способности регистрирующего электронного тракта [8].

В методах спектральной ОКТ интерферометрические сигналы регистрируются одновременно для всех слоев, поэтому требование к глубине фокусировки вносит ограничения на допустимые значения апертуры объектива, вследствие чего разрешающая способность таких систем в боковом направлении составляет примерно 10—20 мкм.

Преимущество спектральной ОКТ с перестраиваемой длиной волны состоит в возможности регистрации полезной информации по всему полю исследуемого участка (при использовании матрицы детекторов). Однако для быстродействующих перестраиваемых лазеров это преимущество в настоящее время не используется ввиду недостаточного быстродействия видеокамер приемлемой стоимости. При использовании линейки фотодиодов и аналоговой обработки интерферометрических сигналов достигается быстродействие до нескольких десятков B -сканов (томограмм в нормальных сечениях объекта по глубине) в секунду [10, 11], что соответствует телевизионному качеству отображения в режиме реального времени.

Примеры практического применения методов интерферометрии малой когерентности и оптической когерентной томографии. Методы бесконтактного контроля различных объектов с высокой разрешающей способностью позволяют оптимизировать режимы технологических процессов модификации или создания различных материалов.

На рис. 3 приведен пример поверхности полимерного материала (поликарбоната), модифицированной лазерным гравером, в виде полутоновой карты высот [6]. Рельеф поверхности восстановлен с использованием микроинтерферометра малой когерентности с длиной когерентности излучения около 1 мкм. Для участков, выделенных прямоугольниками, представлены соответствующие значения отклонений микрорельефа (z).

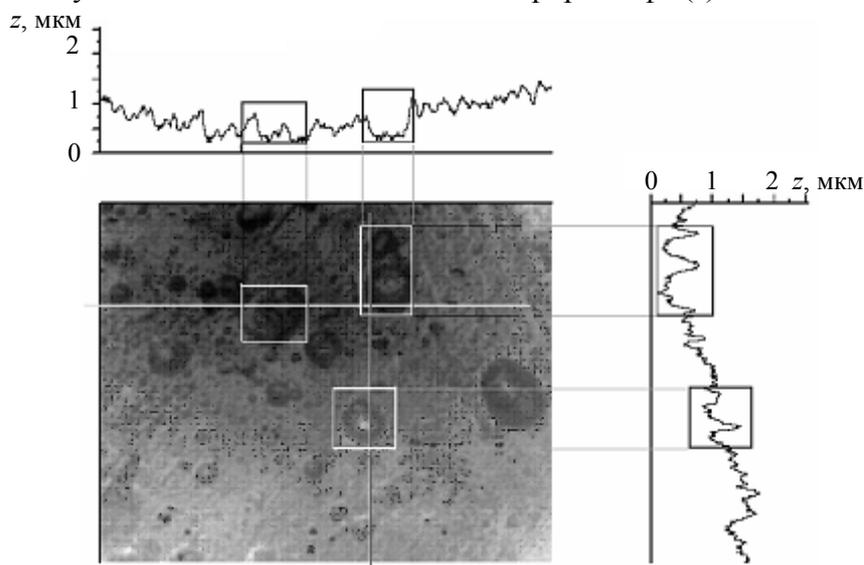


Рис. 3

Из рисунка видно, что метод характеризуется разрешающей способностью по высоте микрорельефа на субмикрометровом уровне, что позволяет оценить отклонения рельефа внутри областей, соответствующих пятну (диаметром 10—15 мкм) светового пучка лазерного гравера. Полученная информация дает возможность оптимизировать режим работы лазерного гравера для обеспечения требуемого воздействия на полимерный материал.

На рис. 4 представлен пример микротомограмм (*B*-сканов) бумаги [12], полученных при помощи оптического когерентного микроскопа с разрешающей способностью около 1 мкм по трем координатам. Томограммы рис. 4, *а*, *б* и *в*, получены для соседних параллельных сечений материала на расстоянии 5 и 20 мкм соответственно. Плотность материала бумаги составляла 9 г/м². Размеры *B*-скана — 200 мкм в боковом направлении и 19 мкм по глубине.

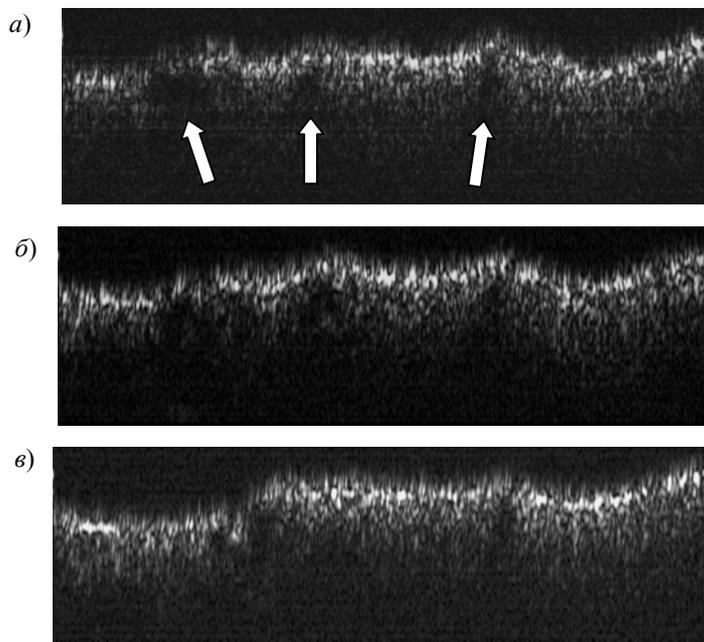


Рис. 4

На томограммах различимы отмеченные стрелками области с малой степенью отражения (микропоры в материале бумаги), которые расположены в близких положениях на рис. 4, *а*, *б* ввиду малого расстояния между сечениями, в отличие от сечения, показанного на рис. 4, *в*. Таким образом, показана возможность определения расположения микропор в материале бумаги, что представляет важную информацию с точки зрения оптимизации технологии производства.

Особое место среди объектов, изучаемых методом ОКТ, занимают предметы искусства, выполненные в технике масляной живописи, прежде всего, с целью изучения защитного слоя лака живописных работ [7, 13]. При использовании метода ОКТ возможно весьма точно определить толщину слоя лака, глубину областей отслаивания, изучить локальные трещины, а также выявить многослойные лаковые покрытия, которые выполнены в разное время с использованием лаков с различающимися физико-химическими свойствами.

На рис. 5 приведен пример исследования слоя лака методом спектральной ОКТ с пере-страиваемой длиной волны источника излучения [14]: *а* — трехмерная томограмма образца лакового покрытия с царапиной, подложкой служил картон; *б* — пример *B*-скана (ширина скана 6 мм). Толщина лака около 80 мкм.

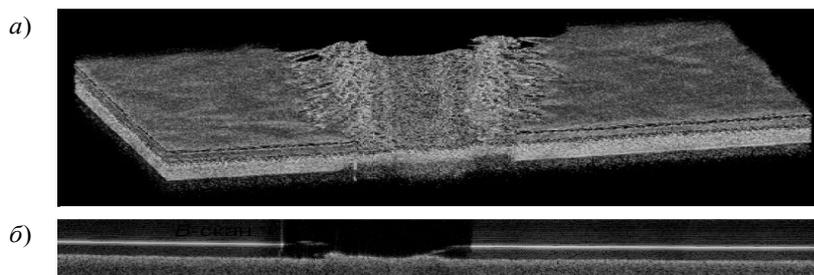


Рис. 5

Полученные результаты наглядно иллюстрируют возможности применения методов ОКТ для решения различных задач диагностики состояния предметов искусства.

Заключение. Проведенное рассмотрение основных характеристик и результатов применения методов интерферометрии малой когерентности и ОКТ показывает широкие возможности современной оптики, фотоники и компьютерных технологий для решения актуальных проблем исследования свойств различных материалов и объектов в научных исследованиях и современных высоких технологиях.

Методы интерферометрии малой когерентности и ОКТ обеспечивают возможность проведения неразрушающих исследований микроструктуры разнообразных материалов органической и неорганической природы с различным масштабом неоднородностей и разными оптическими свойствами. Отличительная особенность методов ОКТ состоит в наиболее высокой разрешающей способности по сравнению с другими методами томографии, что позволяет разрабатывать новые перспективные методики исследований.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Dresel T., Häusler G., Ventzke H.* Three-dimensional sensing of rough surfaces by coherence radar // *Appl. Opt.* 1992. Vol. 31. P. 919—925.
2. *Васильев В. Н., Гуров И. П.* Технология бесконтактного контроля объектов на основе когерентного и спектрального радаров в биомедицинских исследованиях и промышленности // *Оптические и лазерные технологии.* СПб: СПбГИТМО (ТУ), 2002. С. 160—175.
3. *Fercher A. F., Drexler W., Hitzenberger C. K., Lasser T.* Optical coherence tomography — principles and applications // *Rep. Prog. Phys.* 2003. Vol. 66. P. 239—303.
4. *Гуров И. П.* Оптическая когерентная томография: принципы, проблемы и перспективы // *Проблемы когерентной и нелинейной оптики.* СПб: СПбГУ ИТМО, 2004. С. 6—30.
5. *Tomlins P. H., Wang R. K.* Theory, developments and applications of optical coherence tomography // *J. Phys. D: Appl. Phys.* 2005. Vol. 38. P. 2519—2535.
6. *Gurov I., Volynsky M.* Evaluation of test polymer samples by full-field low-coherence interferometric profilometer // *Proc. OSAV'2008. 3rd Intern. Topical Meeting on Optical Sensing and Artificial Vision.* St. Petersburg: St. Petersburg State University ITMO, 2008. P. 384—388.
7. *Adler D. C., Stenger J., Gorczynska I., Lie H., Hensick T., Spronk R., Wolohojian S., Khandekar N., Jiang J. Y., Barry S., Cable A.E., Huber R., Fujimoto J. G.* Comparison of three-dimensional optical coherence tomography and high resolution photography for art conservation studies // *Optics Express.* 2007. Vol. 15. P. 15 972—15 986.
8. *Васильев В. Н., Гуров И. П.* Сравнительный анализ методов оптической когерентной томографии // *Изв. вузов. Приборостроение.* 2007. Т. 50, № 7. С. 30—40.
9. *Dubois A., Grieve K., Moneron G., Lecaque R., Vabre L., Voccaro C.* Ultrahigh-resolution full-field optical coherence tomography // *Appl. Opt.* 2004. Vol. 43. P. 2874—2883.
10. *Kumar K., Condit J. C., McElroy A., Kemp N. J., Hoshino K., Milner T. E., Zhang X.* Fast 3D in vivo swept-source optical coherence tomography using a two-axis MEMS scanning micromirror // *J. Opt. A: Pure Appl. Opt.* 2008. Vol. 10. P. 1—7.
11. *Wieser W., Biedermann B. R., Klein T., Eigenwillig C. M., Huber R.* Multi-Megahertz OCT: High quality 3D imaging at 20 million A-scans and 4.5 GVoxels per second // *Optics Express.* 2010. Vol. 18. P. 14 685—14 704.
12. *Alarousu E., Gurov I., Kalinina N., Karpets A., Margariants N., Myllylä R., Prykäri T., Vorobeva E.* Full-field high-resolving optical coherence tomography system for evaluating paper materials // *Proc. SPIE.* 2008. Vol. 7022. P. 7022.
13. *Liang H., Cid M., Cucu R., Dobre G. M., Podoleanu A. Gh., Pedro J. and Saunders D.* En-face optical coherence tomography — a novel application of non-invasive imaging to art conservation // *Optics Express.* 2005. Vol. 13. N 16. P. 6133—6144.
14. *Волынский М. А., Гуров И. П., Жукова Е. В., Левшина А. В., Маргарянц Н. Б., Семов А. А.* Исследование трехмерной микроструктуры материалов на основе методов оптической когерентной томографии // *Фотография. Изображение. Документ.* СПб: Росфото, 2010.

Сведения об авторах

- Максим Александрович Волынский** — аспирант; Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики; кафедра компьютерной фотоники и видеоинформатики
- Елена Александровна Воробьева** — аспирант; Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики; кафедра компьютерной фотоники и видеоинформатики
- Игорь Петрович Гуров** — д-р техн. наук, профессор; Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики; кафедра компьютерной фотоники и видеоинформатики; зав. кафедрой; E-mail: gurov@mail.ifmo.ru
- Никита Борисович Маргаряни** — Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, кафедра компьютерной фотоники и видеоинформатики, научный сотрудник

Рекомендована
программным комитетом Конференции

Поступила в редакцию
08.09.10 г.