

---

---

# ОПТИЧЕСКИЕ И ОПТИКО-ЭЛЕКТРОННЫЕ ПРИБОРЫ И СИСТЕМЫ

---

---

УДК 535.417 + 535.3 + 53.06  
DOI: 10.17586/0021-3454-2021-64-11-925-932

## КОМБИНИРОВАННЫЙ ОПТИЧЕСКИЙ МЕТОД ИЗМЕРЕНИЯ ТОЛЩИНЫ СЛОЕВ ПРОЗРАЧНЫХ ПОКРЫТИЙ И ПЛЕНОК

А. А. АДАМОВ, В. Н. ХРАМОВ

*Волгоградский государственный университет, 400062, Волгоград, Россия  
E-mail: anton.a.adamov@gmail.com*

Рассматривается задача проведения измерений толщины прозрачных слабоссеивающих и слабопоглощающих слоев неорганических покрытий и пленок в диапазоне от 0,1 до 0,6 мм с относительной погрешностью измерения менее 10 % в режиме реального времени. Измерения выполняются путем применения комбинации двух методов — лазерной интерферометрии и лазерной модифицированной триангуляции. Предмет исследования — определение набора параметров, необходимых для измерения толщины указанными оптическими методами; цель исследования — разработка способа измерения толщины комбинированным методом таким образом, чтобы в наборе необходимых параметров отсутствовал показатель преломления исследуемого образца. Представлен принцип работы при использовании комбинированного метода и осуществлен поиск оптимальных параметров измерительной установки, что позволяет снизить погрешность измерений до 5 % при уменьшении информативности измерения в 3 раза. Главное преимущество предлагаемого подхода заключается в том, что для определения толщины комбинированным методом не требуется информация о числовом значении показателя преломления измеряемого слоя.

***Ключевые слова:** интерферометрия, модифицированная лазерная триангуляция, измерение толщины, показатель преломления, комбинация методов измерения*

**Введение.** Необходимость контролировать толщину слоя прозрачных покрытий и пленок в режиме реального времени возникает при решении исследовательских и прикладных задач, например, при нанесении тем или иным способом изолирующих покрытий на поверхности разной геометрии. Эта проблема актуальна для таких областей, как приборостроение, электротехническая и электронная промышленность, производство вычислительной и научно-исследовательской техники, а также для активно развивающейся области трехмерной печати органических и биологических тканей [1].

Основными требованиями к методу измерений и основанному на нем устройству, которые обусловлены спецификой их применения, являются: безопасность использования; проведение измерений без контакта с поверхностью объекта в режиме реального времени при одностороннем расположении измерительной установки относительно исследуемой поверхности; модульность (возможность замены отдельных частей), простота конструкции (легкий доступ к отдельным узлам и элементам); надежность, экономичность и компактность.

Перечисленные задачи успешно решаются с помощью метода лазерной интерферометрии [2—4]; также в работах [5—9] описывается модификация метода лазерной триангуляции

для его использования в задачах измерения толщины. Существует множество внедренных в производство измерительных устройств [10]. Однако все предложенные методы являются косвенными и для расчета искомой толщины требуют численного значения показателя преломления измеряемого слоя. При этом иногда возникают случаи, когда некоторые оптические характеристики объекта, в частности показатель преломления, могут изменяться от точки к точке и/или с течением времени непосредственно в процессе измерения толщины слоя [11, 12]. Например, в процессе абляции при воздействии на вещество измеряемого образца мощного лазерного излучения в локальной области значение показателя преломления может измениться, что скажется на результате при измерении толщины в режиме реального времени.

Настоящая статья посвящена решению задачи об исключении из списка требуемых параметров для оптического метода измерения (при расчете) толщины слоя числового значения его показателя преломления.

**Теоретическая часть.** Функциональная зависимость между толщиной слоя  $z$  и расстоянием  $x$  между световыми метками на их фотоизображении для модифицированного метода лазерной триангуляции была получена в работах [5—9], а зависимость между толщиной  $z$  и шириной интерференционной полосы  $s$  — в работах [2, 4]. Не теряя общности рассуждений, рассмотрим случай с плоскопараллельными гранями измеряемого слоя. Тогда для определения толщины с помощью комбинации лазерных методов модифицированной триангуляции и интерферометрии можно записать:

$$\left. \begin{aligned} z &= k_1 \frac{2x \sin \beta_1}{M} \frac{\sqrt{n^2 - \sin^2 \alpha}}{\sin 2\alpha} \frac{\sqrt{n^2 - \sin^2 \varphi}}{n}; \\ z &= \frac{\lambda d}{k_2 s} \frac{\sqrt{n^2 - \sin^2 \gamma}}{\sin 2\gamma} \sin \beta_2, \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

где  $M$  — увеличение линз,  $n$  — показатель преломления роговицы,  $\lambda$  — длина волны излучения,  $d$  — расстояние от точки измерения до экрана,  $k_{1,2}$  — калибровочные коэффициенты масштаба размерности мм/пиксел,  $\alpha$  и  $\beta_{1,2}$  — углы наблюдения и положения фотоприемника и экрана,  $\varphi, \gamma$  — углы падения лазерного излучения.

Упрощенная схема измерительного устройства, основанного на комбинации указанных методов, приведена на рис. 1.

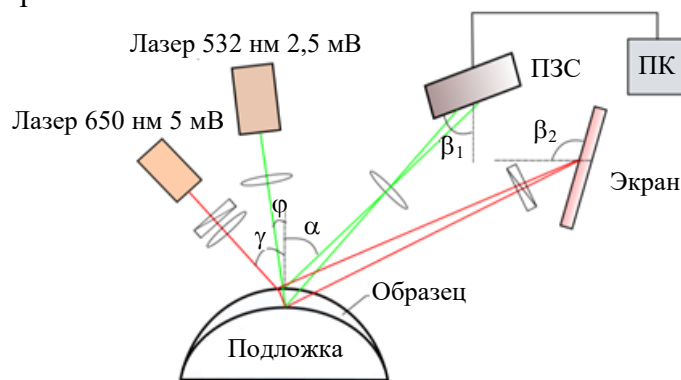


Рис. 1

Система (1), по сути, записана относительно переменных  $z$  и  $n$ , так как наборы параметров триангуляции  $\{k_1, \varphi, \beta_1, \alpha, M\}$  и интерферометрии  $\{k_2, \gamma, \beta_2, \lambda, d\}$  зафиксированы для измерительной установки, а величины  $x$  и  $s$  определяются экспериментально в ходе измерения. Можно записать систему (1) в обобщенном виде:

$$\left. \begin{aligned} z &= f_1(n); \\ z &= f_2(n), \end{aligned} \right\}$$

откуда

$$\left. \begin{aligned} n &= f_1^{-1}(z), \\ z &= f_2(f_1^{-1}(z)). \end{aligned} \right\}$$

Следовательно, толщину для исследуемого слоя можно найти без известного значения показателя преломления (верно и обратное). Показатель преломления  $n$  вносит влияние через величины  $x$  и  $s$ : чем больше значение  $n$ , тем ближе будут расположены световые метки и интерференционные полосы друг к другу при заданных одних и тех же прочих параметрах.

Критерий оптимальности выберем из следующих соображений: так как для определения толщины  $z$  измеряемого слоя нужно знать расстояние между изображениями световых меток  $x$ , т.е. разрешить 2 отдельные световые метки на фотоприемнике, то математически данное условие может быть записано в виде  $x \rightarrow x_{\max}$  ( $s \rightarrow s_{\max}$ ). Верхняя граница определяется геометрией матрицы ПЗС. Для решения данной задачи оптимизации используем систему компьютерной математики — Scilab. Оптимальные значения для углов в триангуляционно-интерферометрической схеме измерения толщины представлены в таблице.

$\gamma$ , рад	$\phi$ , рад	$\alpha$ , рад	$\beta_1$ , рад	$\beta_2$ , рад
0,71	0,71	0,33	1,22	0,20
0,86	0,86	0,20	1,60	0,70
0,63	0,63	0,31	1,99	1,48
1,07	0,62	0,76	1,80	1,61
...	...	...	...	...
<b>1,04</b>	<b>0,52</b>	<b>0,68</b>	<b>0,56</b>	<b>0,001</b>
0,71	0,71	0,23	1,27	1,21
<b>1,23</b>	<b>1,23</b>	<b>2,70</b>	<b>0,33</b>	<b>0,18</b>
<b>0,17</b>	<b>0,17</b>	<b>0,08</b>	<b>-0,04</b>	<b>-0,03</b>

**Экспериментальная часть.** На рис. 2 приведена схема измерительной установки, где 1, 2 — лазерные модули, 3 — блок формирования пучка с плоским фронтом, 4 — делительное зеркало, 5 — КМОП-камера, 6 — дифракционная решетка, 7 — образец на подложке, 8 — фокусирующая система, 9 — ПЗС-камера, 10 — персональный компьютер.

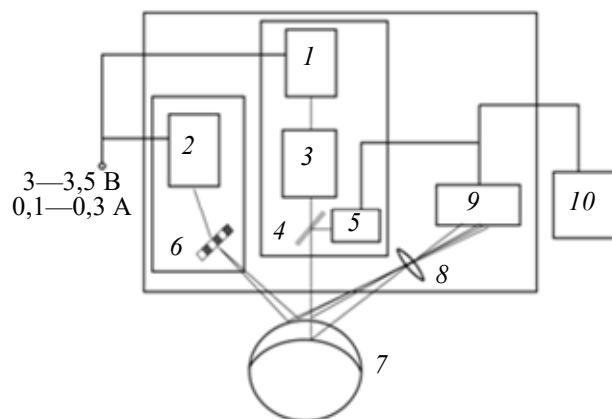


Рис. 2

В установке используются полупроводниковый лазерный модуль 1 с длиной волны в диапазоне 650—660 нм (модель HML1845 Viper Series, фирма Dragon Lasers, производитель Changchun New Industries Optoelectronics Technology Co., Ltd., страна производства Китай) и твердотельный лазер с диодной накачкой 2 с длиной волны 532 нм (модель LR-021 Viper Series, фирма Dragon Lasers, производитель Changchun New Industries Optoelectronics Technology Co., Ltd., страна производства Китай) [13]. Могут быть использованы лазеры, генерирующие излучение на одной и той же длине волны. Питание лазеров осуществляется от источника постоянного тока с параметрами 3,0—3,5 В и 0,1—0,3 А.

Приемниками излучения служат КМОП-камера 5 с разрешением 1,3 Мпкс (1280×720 пкс) и интерполяцией до 8,0 Мпкс и ПЗС-камера 9 1080 P Full HD Sony imx322 0.01lux H.264 AEC AEB с параметрами 2,0 Мпкс, sensor:1/2.9 inch SONY IMX322 (страна производства Тайвань). Обе камеры подключены к блоку обработки информации, в качестве которого выступает ПК 10.

Блок формирования пучка с плоским фронтом 3 состоит из системы двух последовательно расположенных диафрагм с диаметром 1,0—1,5 мм, рассеивающей и собирающей линз, вырезающих центральную часть лазерного пучка и собранных по типу насыпной конструкции с расположением на расстоянии 1,5—2,0 см друг от друга. Более подробное описание и схема установки приведены в работе [14]. Экспериментально определено, что коэффициент ослабления такой системы для лазерного излучения составляет 20 дБ.

Для устранения влияния лазерного излучения на оптические характеристики измеряемых образцов выбраны следующие параметры: выходная мощность непрерывного лазерного излучения не превышает 1 мВт, радиус перетяжки лазерного пучка на поверхности исследуемого объекта не менее 0,1—0,5 мм, плотность мощности лазерного излучения, соответственно, не более 10 мВт/мм<sup>2</sup> [15]; ГОСТ ИЕС 60825-1-2013.

Эксперименты проводились на прозрачных в видимом диапазоне длин волн пленках с показателями преломления от 1,35 до 1,55 из полиэтилена, поливинилхлорида, полистирола и желатина на водной и твердотельной подложках. Результаты совместно с их обработкой в реализованных программах [16, 17] приведены в работах [4—9]. Значения  $z$  (толщина слоя), при которых возможно разрешить две отдельные световые метки на изображении при использовании лазеров с выходной мощностью не более 1 мВт, радиусом перетяжки пучка на поверхности не менее 0,1 мм и относительной погрешностью не более 10 %, лежат в пределах от 0,1 до 0,6 мм.

Не все комбинации углов (см. таблицу), дающие экстремум функции, имеют физический смысл, например, жирным курсивом выделены строки, в которых указаны физически и/или технически нереализуемые варианты. Выберем следующий приемлемый набор:  $\varphi = \gamma = 0,71 \text{ рад} = 41^\circ$ ,  $\alpha = 0,23 \text{ рад} = 13^\circ$ ,  $\beta_1 = 1,27 \text{ рад} = 73^\circ$ ,  $\beta_2 = 1,21 \text{ рад} = 69^\circ$  [18].

Если аппроксимировать зависимость относительной погрешности измерения от толщины измеряемого слоя, то для интерферометрического метода  $\varepsilon_{\text{interf}}(z) = (az + b) \cdot 100\%$ , а для модифицированного метода лазерной триангуляции  $\varepsilon_{\text{triang}}(z) = (c/z + g) \cdot 100\%$ , где  $a, b, c, g$  — константы, определяемые из эксперимента. При неоптимальном наборе  $a = 0,15 \text{ мм}^{-1}$ ,  $b = 0,01$ ,  $c = 0,01 \text{ мм}$ ,  $g = 0,005$ ; при оптимальном существенно изменяется только  $c = 0,002 \text{ мм}$ . На рис. 3 представлены зависимости погрешностей для неоптимального (10 %) и оптимизированного (5 %) методов (обозначен с индексом „opt“). Диапазоны измерений при оптимизированном методе —  $L_{10\%}^{\text{opt}} = AB = 0,58 \text{ мм}$ ,  $L_{5\%}^{\text{opt}} = AD = 0,21 \text{ мм}$ ; при неоптимизированном —  $L_{10\%} = EB = 0,45 \text{ мм}$ ,  $L_{5\%} = CD = 0,05 \text{ мм}$ .

Информативность  $I$  — мера новой информации, заключенной в измерении [19]:

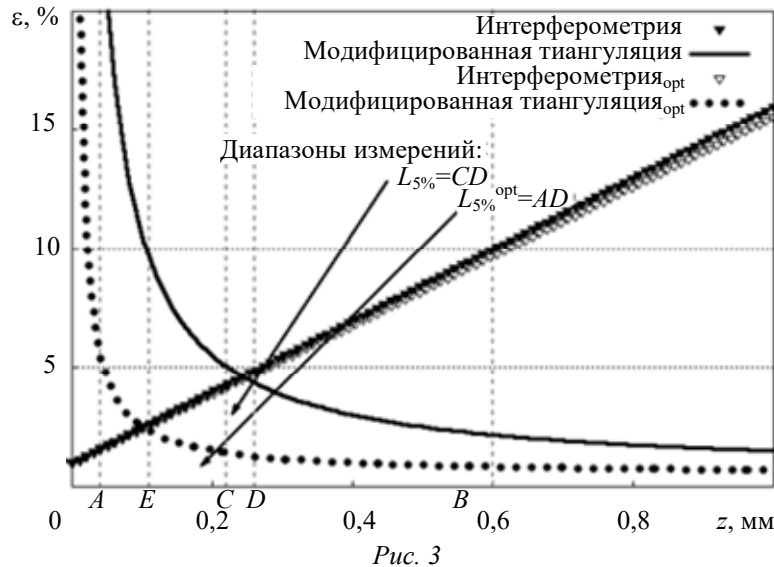
$$I = L/\sigma, \quad (2)$$

где  $\sigma$  — среднеквадратическое отклонение случайной погрешности измерения, т.е. при увеличении диапазона измерения и уменьшении значения случайной погрешности прибор (метод) дает большее количество полезной информации.

В случае  $\sigma_{10\%} = \sigma_{5\%}$

$$\frac{I_{10\%}}{I_{5\%}} = \frac{L_{10\%}}{L_{5\%}} \leq 10, \quad \frac{I_{10\%}^{\text{lim}}}{I_{5\%}^{\text{lim}}} = \frac{L_{10\%}^{\text{lim}}}{L_{5\%}^{\text{lim}}} \leq 2,7.$$

При снижении максимального заданного уровня допустимой относительной погрешности от 10 до 5 % информативность падает на порядок в случае использования неоптимальных параметров и снижается менее чем в 3 раза при оптимальных.



**Алгоритм измерений.** Приведем алгоритм проведения измерения толщины прозрачного слоя неорганического покрытия или пленки комбинированным методом.

**Шаг 1.** С помощью лазерного излучения от модуля 2 и дифракционной решетки 6 (см. рис. 2) на поверхности измерения формируется дифракционная картина с известным расстоянием между пучностями интенсивности излучения для проведения калибровки фотокамеры 9 прибора, после чего решетку убирают в сторону.

**Шаг 2.** Излучение от лазерного модуля 1, после прохождения формирующей системы 3, фокусируется на передней поверхности измеряемого слоя 7 под заданным углом с помощью системы из полупрозрачного зеркала 4 и вспомогательной фотокамеры 5.

**Шаг 3.** Излучение от лазерного модуля 2 фокусируется (система линз на рис. 2 не показана) на исследуемой поверхности в точке фокусировки излучения модуля 1.

**Шаг 4.** Формируемые триангулограммы и интерферограммы (возможны два варианта: использование вспомогательного экрана, на рисунке не показан, либо непосредственно на приемнике излучения) регистрируются камерой 9 и обрабатываются с помощью ПК 10.

В результате формируется единый набор параметров, используемых в двух методах:  $\{k_1, k_2, \varphi, \gamma, \beta_1, \beta_2, \alpha, \lambda, M, d, x, s\}$ , который необходим для итогового вычисления толщины слоя и не содержит показателя преломления.

**Заключение.** По результатам исследования можно сделать следующие выводы:

- использование комбинированного оптического метода измерения толщины позволяет исключить из набора необходимых параметров числовое значение показателя преломления;
- при выбранном критерии оптимальности для параметров измерительной установки можно снизить погрешность измерений с 10 до 5% при уменьшении информативности измерения всего в 3 раза.

Измерительная установка, разработанная на основе предложенной комбинации лазерных методов, при апробации показала свою работоспособность. Представленный измеритель может найти применение в процессе нанесения покрытий или производства пленок на промышленных предприятиях и при решении научно-технических задач.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Sorkio A., Koch L., Koivusalo L., Deiwick A., Miettinen S., Chichkov B., Skottman H.* Human stem cell based corneal tissue mimicking structures using laser-assisted 3D bioprinting and functional bioinks // *Biomaterials*. 2018. Vol. 171. P. 57—71.
2. *Green D. G., Frueh B. R., Shapiro J. M.* Corneal thickness measured by interferometry // *J. of the Optical Society of America*. 1975. Vol. 65, N 2. P. 119—123.
3. *Приезжев А. В., Тучин В. В., Шубочкин Л. П.* Лазерная диагностика в биологии и медицине М.: Наука, 1989. 240 с.
4. *Adamov A. A., Baranov M. S., Khramov V. N.* Numerical and experimental selection of optimal parameters in the interferometric method of measuring the thickness of the cornea // *Proc. SPIE 11066, Saratov Fall Meeting, 2018: Laser Physics, Photonic Technologies, and Molecular Modeling*, 1106608 (3 June 2019). DOI: 10.1117/12.2521424.
5. *Адамов А. А., Храмов В. Н.* Оценка возможности применения метода лазерной триангуляции к измерениям толщин тонких пленок // *Математическая физика и компьютерное моделирование*. 2017. Т. 20, № 4. С. 83—94.
6. *Adamov A. A., Khramov V. N.* Modification of the laser triangulation method for measuring the thickness of optical layers // *Proc. SPIE 10717, Saratov Fall Meeting 2017: Laser Physics and Photonics XVIII; and Computational Biophysics and Analysis of Biomedical Data IV*, 1071703 (26 April 2018). DOI: 10.1117/12.2314820.
7. *Adamov A. A., Baranov M. S., Khramov V. N., Abdrakhmanov V. L., Golubev A. V., Chechetkin I. A.* Modified method of laser triangulation // *Intern. Conf. PhysicA.SPb/2018, IOP Conf. Series: J. of Physics: Conf. Series*1135 (2018) 012049. DOI: 10.1088/1742-6596/1135/1/012049.
8. *Adamov A. A., Baranov M. S., Khramov V. N.* Optimization of parameters in a modified laser triangulation method // *Proc. SPIE 11066, Saratov Fall Meeting 2018: Laser Physics, Photonic Technologies, and Molecular Modeling*, 1106607 (3 June 2019). DOI:10.1117/12.2521419.
9. *Adamov A. A., Khramov V. N.* The optimal parameters of the laser triangulation modified thickness meter // *J. of Physics: Conf. Series*. 2019. Vol. 1368, iss. 2, article id. 022001. DOI:10.1088/1742-6596/1368/2/022001.
10. *Адамов А. А., Баранов М. С., Храмов В. Н., Абдрахманов В. Л., Голубев А. В., Четчин И. А.* База данных. Измерители толщин тонких прозрачных тканей и пленок // *Официальный бюл. Федеральной службы по интеллектуальной собственности (Роспатент)*, № 2018620590. М.: ФИПС, 2018. № 4-2018, 21.03.2018-20.04.2018.
11. *Lun-Kai Cheng, Toet P. M.* Innovative fiber bragg grating sensors for highly demanding applications: considerations, concepts, and designs // *Opto-Mechanical Fiber Optic Sensors: Ed. H. Alemohammad*. Butterworth-Heinemann, 2018. P. 175—209. DOI.org/10.1016/B978-0-12-803131-5.00007-6
12. *Coelho J. M. P., Nespereira M. C., Abreu M., Rebordão J. M.* Modeling refractive index change in writing long-period fiber gratings using mid-infrared laser radiation // *Photonic Sensors*. 2013. Vol. 3, N 1. P. 67—73.
13. *Адамов А. А., Баранов М. С., Храмов В. Н.* Зависимость спектральных характеристик полупроводниковых и твердотельных лазеров видимого диапазона от температуры активной среды // *Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики*. 2018. Т. 18, № 3. С. 356—362. DOI: 10.17586/2226-1494-2018-18-3-356-362.
14. Пат. 179826 РФ. Лазерный триангуляционный измеритель толщины роговицы и остаточных роговичных слоев глаза / *А. А. Адамов, М. С. Баранов, В. Н. Храмов, В. Л. Абдрахманов, А. В. Голубев, И. А. Четчин*. Оpubл. 24.05.2018. Бюл. №15.
15. Лазерная безопасность [Электронный ресурс]: <[https://stormoff.ru/mediacenter/articles/article\\_66/](https://stormoff.ru/mediacenter/articles/article_66/)>, 18.06.2021.
16. *Адамов А. А., Абдрахманов В. Л., Голубев А. В., Четчин И. А.* Программное средство обработки изображений экспериментальных данных для оценки расстояния между световыми метками // *Официальный бюл. Федеральной службы по интеллектуальной собственности (Роспатент)*, № 2017664237. М.: ФИПС, 2017. № 12-2017, 21.11.2017-20.12.2017.
17. *Адамов А. А.* Программа обработки фотоизображений экспериментальных интерферограмм для определения значения ширины и угла наклона интерференционных полос // *Официальный бюл. Федеральной службы по интеллектуальной собственности (Роспатент)*, № 2018666945. М.: ФИПС, 2019. № 1-2019, 21.12.2018-20.01.2019.

18. Adamov A. A., Khramov V. N. Optimal parameters of laser meter optical characteristics of the cornea // Physics, Engineering and Technologies for Biomedicine: Proc. of the 4th Intern. Symp. and Intern. School for Young Scientists, Moscow, Oct. 26—30, 2019. P. 90—91.
19. Кирилловский В. К., Точилина Т. В. Оптические измерения. Ч. 1. Введение и общие вопросы. Точность оптических измерений: Учеб. пособие. СПб: Университет ИТМО, 2017. 49 с.

**Сведения об авторах****Антон Андреевич Адамов**

— Волгоградский государственный университет, Институт математики и информационных технологий; мл. научный сотрудник;  
E-mail: anton.a.adamov@gmail.com

**Владимир Николаевич Храмов**

— канд. физ.-мат. наук, доцент; Волгоградский государственный университет, кафедра радиофизики; E-mail: vladimir.khramov@volsu.ru

Поступила в редакцию  
27.05.2021 г.

**Ссылка для цитирования:** Адамов А. А., Храмов В. Н. Комбинированный оптический метод измерения толщины слоев прозрачных покрытий и пленок // Изв. вузов. Приборостроение. 2021. Т. 64, № 11. С. 925—932.

**COMBINED OPTICAL METHOD FOR MEASURING THE THICKNESS OF LAYERS OF TRANSPARENT COATINGS AND FILMS****A. A. Adamov, V. N. Khramov**

*Volgograd State University, 400062, Volgograd, Russia*  
*E-mail: anton.a.adamov@gmail.com*

The problem of measuring the thickness of transparent low-scattering and low-absorbing layers of inorganic coatings and films in the range from 0.1 mm to 0.6 mm in real time with a relative measurement error of less than 10% is considered. The measurements are performed using a combination of two methods – laser interferometry and modified triangulation. The subject of the study is to determine the set of parameters necessary for measuring the thickness by the specified optical methods; the purpose of the study is to develop a way to measure the thickness by the combined method so that the refractive index of the sample under study is absent in the set of necessary parameters. The principle of operation when using the combined method is presented and the search for optimal parameters of the measuring installation is carried out, which allows to reduce the measurement error to 5% while reducing the information content of the measurement by 3 times only. The main advantage of the proposed approach is that information on the numerical value of the refractive index of the measured layer is not required to determine the thickness by the combined method.

**Keywords:** interferometry, modified laser triangulation, thickness measurement, refractive index, combination of measurement methods

**REFERENCES**

1. Sorkio A., Koch L., Koivusalo L., Deiwick A., Miettinen S., Chichkov B., Skottman H. *Biomaterials*, 2018, vol. 171, pp. 57–71.
2. Green D.G., Frueh B.R., Shapiro J.M. *Journal of the Optical Society of America*, 1975, no. 2(65), pp. 119–123.
3. Priezzhev A.V., Tuchin V.V., Shubochkin L.P. *Lazernaya diagnostika v biologii i meditsine* (Laser Diagnostics in Biology and Medicine), Moscow, 1989, 240 p. (in Russ.)
4. Adamov A.A., Baranov M.S., Khramov V.N. *Proc. SPIE 11066, Saratov Fall Meeting, 2018: Laser Physics, Photonic Technologies, and Molecular Modeling*, 3 June 2019, article ID 1106608, DOI: 10.1117/12.2521424.
5. Adamov A.A., Khramov V.N. *Mathematical Physics and Computer Simulation*, 2017, no. 4(20), pp. 83–94. (in Russ.)
6. Adamov A.A., Khramov V.N. *Proc. SPIE 10717, Saratov Fall Meeting 2017: Laser Physics and Photonics XVIII; Computational Biophysics and Analysis of Biomedical Data IV*, 26 April 2018, article ID 1071703, DOI: 10.1117/12.2314820
7. Adamov A.A., Baranov M.S., Khramov V.N., Abdrakhmanov V.L., Golubev A.V., Chechetkin I.A. *International Conference Physica.SPB/2018, IOP Conf. Series: Journal of Physics*, Conf. Series, 2018, vol. 1135, article ID 012049, DOI:10.1088/1742-6596/1135/1/012049.
8. Adamov A.A., Baranov M.S., Khramov V.N. *Proc. SPIE 11066, Saratov Fall Meeting 2018, Laser Physics, Photonic Technologies, and Molecular Modeling*, 3 June 2019, article ID 1106607, DOI:10.1117/12.2521419.

9. Adamov A.A., Khramov V.N. *Journal of Physics: Conf. Series*, 2019, no. 2(1368), article ID 022001, DOI:10.1088/1742-6596/1368/2/022001.
10. Patent RU 2018620590, *Baza dannykh Izmeriteli tolshchin tonkikh prozrachnykh tkaney i plenok* (Database Gauges of thicknesses of thin transparent fabrics and films), A.A. Adamov, M.S. Baranov, V.N. Khramov, V.L. Abdrakhmanov, A.V. Golubev, I.A. Chechetkin, Priority 21.03.2018, Published 20.04.2018, Bulletin 4. (in Russ.)
11. Lun-Kai Cheng, Toet P.M. *Opto-Mechanical Fiber Optic Sensors*, Butterworth-Heinemann, 2018, pp. 175–209, DOI.org/10.1016/B978-0-12-803131-5.00007-6.
12. Coelho J.M.P., Nespereira M.C., Abreu M., and Rebordão J.M. *Photonic Sensors*, 2013, no. 1(3), pp. 67–73.
13. Adamov A.A., Baranov M.S., Khramov V.N. *Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics*, 2018, no. 3(18), pp. 356–362, DOI: 10.17586/2226-1494-2018-18-3-356-362. (in Russ.)
14. Patent RU RU179826U1, *Lazernyy triangulyatsionnyy izmeritel' tolshchiny rogovitsy i ostatochnykh rogovichnykh sloyev glaza* (Laser Triangulation Measurer for Thickness of the Corneal and Residual Corneal Eye Layers), A.A. Adamov, M.S. Baranov, V.N. Khramov, V.L. Abdrakhmanov, A.V. Golubev, I.A. Chechetkin, Priority 2017-11-07, Published 2018-05-24, Bulletin 15. (in Russ.)
15. [https://stormoff.ru/mediacenter/articles/article\\_66](https://stormoff.ru/mediacenter/articles/article_66). (in Russ.)
16. Patent RU2017664237, *Programmnoye sredstvo obrabotki izobrazheniy eksperimental'nykh dannykh dlya otsenki rasstoyaniya mezhdu svetovymi metkami* (Experimental Data Image Processing Software for Estimating the Distance between Light Marks), A.A. Adamov, V.L. Abdrakhmanov, A.V. Golubev, I.A. Chechetkin, Priority 21.11.2017, Published 20.12.2017, Bulletin 12. (in Russ.)
17. Patent RU2018666945, *Programma obrabotki fotoizobrazheniy eksperimental'nykh interferogramm dlya opredeleniya znacheniya shiriny i ugla naklona interferentsionnykh polos* (Program for Processing Photographic Images of Experimental Interferograms to Determine the Value of the Width and Angle of Inclination of Interference Fringes), A.A. Adamov, Priority 21.12.2018, Published 20.01.2019. (in Russ.)
18. Adamov A.A., Khramov V.N. *Physics, Engineering and Technologies for Biomedicine*, The 4th International Symposium and International School for Young Scientists, October 26–30, 2019, Moscow, 2019, pp. 90–91.
19. Kirillovsky V.K., Tochilina T.V. *Opticheskiye izmereniya. Chast' 1. Vvedeniye i obshchiye voprosy. Tochnost' opticheskikh izmereniy* (Optical Measurements. Part 1. Introduction and General Questions. Accuracy of Optical Measurements), St. Petersburg, 2017, 49 p. (in Russ.)

#### Data on authors

- Anton A. Adamov** — Volgograd State University, Institute of Mathematics and Information Technologies; Junior Researcher; E-mail: anton.a.adamov@gmail.com
- Vladimir N. Khramov** — PhD, Associate Professor; Volgograd State University, Department of Radio Physics; E-mail: vladimir.khramov@volsu.ru

**For citation:** Adamov A. A., Khramov V. N. Combined optical method for measuring the thickness of layers of transparent coatings and films. *Journal of Instrument Engineering*. 2021. Vol. 64, N 11. P. 925–932 (in Russian).

DOI: 10.17586/0021-3454-2021-64-11-925-932