Определение параметров первого слоя покрытия при широкополосном оптическом контроле процесса напыления

Т. Ф. Исаев,^{1,2} Ю.С. Лагутин,^{1,2,3} А.А. Лагутина,^{1,2,3, а}

Д.В. Лукьяненко,^{1,2,3} О.Ф. Просовский,⁴ А.В. Тихонравов,^{2,3} А.Г. Ягола^{1,2}

¹ Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова,

физический факультет, кафедра математики.

Россия, 119991, Москва, Ленинские горы, д. 1, стр. 2.

² Научно-исследовательский вычислительный центр МГУ имени М.В. Ломоносова.

Россия, 119991, Москва, Ленинские горы, д. 1, стр. 4.

³ Московский центр фундаментальной и прикладной математики.

Россия, 119234, Москва, Ленинские горы, д. 1.

⁴ АО ОНПП «Технология». Россия, 249031, г. Обнинск, Калужская область, Киевское шоссе, 15.

Поступила в редакцию 08.06.2021, после доработки 14.06.2021, принята к публикации 15.06.2021.

Точность определения параметров первого слоя оптического покрытия имеет определяющее значение для точности контроля процесса напыления всего многослойного покрытия. В работе предлагается применять нелокальный алгоритм анализа данных оптического мониторинга, позволяющий использовать более точную модель слоя. Возможности нового нелокального алгоритма демонстрируются на примере исследования параметров первого слоя покрытия из оксида ниобия, который является одним из основных пленкообразующих материалов с высоким показателем преломления.

Ключевые слова: оптические покрытия, широкополосный оптический контроль, модель слоя, алгоритмы анализа данных.

УДК: 535.4. PACS: 42.25.Hz.

введение

Современные технологии напыления многослойных оптических покрытий [1] и математические методы их проектирования [2] позволяют создавать покрытия с уникальными спектральными свойствами. При этом серьезной проблемой остается повышение точности контроля расчетных параметров покрытий в процессе их изготовления. Основными расчетными параметрами являются толщины слоев покрытий, и для их контроля в процессе напыления широко используются различные методы оптического контроля [3]. Среди них особое внимание в последние годы уделяется методам широкополосного оптического контроля. При использовании последних в процессе напыления каждого слоя покрытия получаются огромные массивы экспериментальных данных. Как правило, это широкополосные спектры коэффициента пропускания покрытия, измеряемые внутри напылительной камеры через короткие интервалы времени порядка одной или нескольких секунд. Наличие таких объемов экспериментальных данных позволяет более глубоко подойти к вопросу о повышении точности контроля толщин слоев оптических покрытий.

При использовании любых методов оптического контроля ошибки в параметрах ранее напыленных слоев влияют на точность контроля каждого нового напыляемого слоя [4]. Это приводит к корреляции ошибок в толщинах слоев покрытия. Негативным следствием данной корреляции может быть очень сильный кумулятивный эффект роста ошибок [5]. Особенно сильное негативное воздействие на точность контроля всего покрытия могут оказать ошибки в параметрах первого слоя покрытия, поскольку существует еще и так называемая проблема первого слоя [6]. В отличие от всех остальных первый слой наносится на чистую подложку, что часто приводит к заметному отличию его показателя преломления от показателей преломления последующих слоев из того же материала [6]. Возможны и другие особенности первого слоя покрытия. Поэтому повышение точности определения параметров этого слоя имеет определяющее значение для повышения точности контроля процесса напыления всего покрытия в целом.

Задача о нахождении параметров слоя по измеренным данным является типичной обратной задачей математической физики, и для ее успешного решения необходимо использование основополагающих идей теории решения некорректно поставленных обратных задач [7]. Такими идеями являются: обоснованный выбор математической модели слоя, максимальный учет имеющейся в распоряжении исследователей априорной информации об искомых параметрах модели, построение устойчивых алгоритмов решения обратной задачи. Эти вопросы рассматриваются в разд. 1 данной работы. В разд. 2 приводятся результаты численного определения параметров первого слоя покрытия на основе данных широкополосного оптического контроля и обсуждаются физически обоснованные подходы к верификации расчетных данных. Полученные выводы приведены в Заключении.

1. МОДЕЛИ СЛОЯ И АЛГОРИТМЫ АНАЛИЗА ДАННЫХ ИЗМЕРЕНИЙ

В случае широкополосного оптического контроля важнейшее значение для надежного определения параметров первого слоя покрытия имеет наличие большого объема экспериментальных данных, получаемых в процессе его напыления. В данной работе

^a E-mail: lagutina.math@gmail.com

мы демонстрируем возможности использования всех этих данных на примере исследования параметров первого слоя покрытия, образованного на основе оксида ниобия Nb_2O_5 . Этот материал является одним из наиболее широко используемых на практике пленкообразующих материалов с высоким показателем преломления.

Для нанесения покрытия с первым слоем из Nb_2O_5 использовалась модернизированная вакуумная камера Balzerz BAK-1052, на которой была установлена новая система широкополосного оптического мониторинга немецкой фирмы BR-optics GmbH. Измерение спектров коэффициента пропускания во время напыления производилось через каждые 2 с. При этом каждый спектр содержал 1494 точки на сетке длин волн в спектральном диапазоне от 400 нм до 1000 нм. Общее число измеренных спектров в течение напыления первого слоя составило 184. Данные измерений, полученные при напылении первого слоя покрытия, представлены на рис. 1.

В обсуждаемом эксперименте напылялся слой с целевой толщиной 68.11 нм. Контроль толщины осуществлялся по минимуму невязки между измеренным спектром пропускания и ожидаемым в конце напыления слоя спектром с помощью программы контроля, поставляемой вместе с системой широкополосного оптического мониторинга. Понятно, что толщина реально напыленного слоя может отличаться от планируемого значения. Нашей задачей является возможно более точное определение истинной толщины и других параметров напыленного слоя.

При численной обработке данных измерений важнейший вопрос — правильный выбор модели слоя. Эта модель должна включать в себя основной искомый параметр — толщину слоя. В модель также включается параметрическое представление дисперсионной зависимости показателя преломления слоя от длины волны. Возможно также включение и других параметров, необходимость учета которых обсуждается далее.



Рис. 1. Данные измерений коэффициента пропускания, полученные при напылении первого слоя покрытия: число измеренных спектров коэффициента пропускания равно 184, число точек по длине волны в каждом спектре

равно 1494

В рассматриваемых нами видимой и ближней $\rm UK$ -областях спектра $\rm Nb_2O_5$ является слабо поглощающим материалом, а дисперсионная зависимость его показателя преломления хорошо описывается моделью Коши:

$$n(\lambda) = A + \frac{B}{\lambda^2} + \frac{C}{\lambda^4},\tag{1}$$

где $A,\,B,\,C$ — некоторые коэффициенты, λ — длина волны.

Зависимость показателя преломления от длины волны, определяемая моделью (1), была заранее детально исследована на основе преломления Nb₂O₅ от длины волны в экспериментах с существенно более толстыми, чем первый слой, однослойными покрытиями, что необходимо для более надежного определения хода дисперсионной зависимости [8]. При этом были найдены следующие значения для набора входящих в (1) параметров: A = 2.1239, $B = 1.7656 \cdot 10^4$, $C = 3.8222 \cdot 10^9$ (предполагается, что в (1) длина волны задается в нанометрах).

Хорошо известно, что напыляемые тонкие пленки часто оказываются неоднородными по толщине [8]. Неоднородность определяется в первую очередь вариациями плотности напыляемой пленки, что приводит к изменению ее показателя преломления в процессе напыления. Поскольку изменения плотности являются достаточно малыми, то ход дисперсионной зависимости показателя преломления изменяется незначительно, и вариации показателя преломления пленки сводятся в первом приближении к сдвигу дисперсионной зависимости вверх или вниз в целом. Это позволяет представить зависимость показателя преломления пленки с малой неоднородностью в виде [8]:

$$n(z,\lambda) = n(\lambda)q(z),$$

где q(z) — так называемый фактор неоднородности слоя [8], z — высота, отсчитываемая от поверхности подложки.

Для фактора неоднородности слоя можно ввести простое параметрическое представление исходя из предположения Шредера [9] о том, что показатель преломления неоднородной пленки является гладкой функцией и незначительно отличается от своего среднего значения. При таких условиях все интерференционные эффекты, связанные с неоднородностью показателя преломления внутри пленки, можно игнорировать и учитывать только те интерференционные эффекты, которые связанны с резкими изменениями показателя преломления на границах пленки. В рамках приближения Шредера конкретный тип отклонения показателя преломления от его среднего значения n_{mean} не является существенным. Исходя из этого можно считать, что показатель преломления слоя линейно изменяется от значения $n_{\rm int}$ на внутренней границе пленки с подложкой до значения nout на внешней границе пленки. При этом фактор неоднородности пленки описывается формулой

$$q(z) = 1 + \frac{\delta}{100\%} \left(\frac{z}{d} - \frac{1}{2}\right),$$

где d — толщина пленки. Входящий в эту формулу параметр δ называется степенью неоднородности пленки. Он обычно выражается в процентах и связан с введенными выше значениями показателя преломления пленки формулой

$$\delta = \frac{n_{\rm out} - n_{\rm int}}{n_{\rm mean}} \cdot 100\%$$

Для повышения устойчивости решения обратной задачи желательно использовать модели с ограниченным числом наиболее существенных с физической точки зрения параметров [7]. Поскольку дисперсионная зависимость показателя преломления Nb_2O_5 была надежно определена заранее, мы будем рассматривать только возможность вариации $n(\lambda)$ вверх или вниз в целом, т.е. будем включать в число искомых параметров модели только коэффициент A из формулы (1).

В следующем разделе мы рассмотрим численные результаты, получаемые для двух- и трехпараметрических моделей первого слоя. В случае двухпараметрической модели параметрами являются толщина d напыленного слоя и коэффициент A в формуле (1). Во случае трехпараметрической модели дополнительно учитывается еще и степень неоднородности слоя δ .

Для построения устойчивых алгоритмов решения обратной задачи большое значение имеет эффективное использование всех имеющихся в наличии экспериментальных данных. В настоящее время для определения параметров напыленных слоев покрытий широко применяются алгоритмы, которые мы будем называть локальными. Они основываются на минимизации функционалов невязки между экспериментальными данными, полученными в конце напыления слоев, и соответствующими теоретическими спектрами коэффициентов пропускания, рассчитанными на основе выбранной модели слоя или покрытия. В случае первого слоя покрытия минимизируемый функционал, который мы будем называть локальным функционалом невязки, вводится как

$$F_{\rm loc}\left(p\right) = \sqrt{\frac{1}{|\{\lambda\}|} \sum_{\{\lambda\}} \left(T_{\rm end}(\lambda, p) - T_{\rm end}^{\rm meas}(\lambda)\right)^2}, \quad (2)$$

где $T_{\rm end}^{\rm meas}(\lambda)$ — измеренный в конце напыления первого слоя спектр, $T_{\rm end}(\lambda,p)$ — рассчитанный на основании выбранной модели спектр напыленного слоя в диапазоне значений $\{\lambda\}$, а p — набор параметров модели.

Как мы видим, локальный алгоритм анализирует лишь малую часть представленных на рис. 1 экспериментальных данных, а именно только последний из измеренных спектров. В этой работе мы используем также нелокальный алгоритм решения обратной задачи, который анализирует все имеющиеся данные и основывается на минимизации нелокального функционала невязки, определяемого выражением

$$F_{\text{nonloc}}(p) = \sqrt{\frac{1}{|\{\lambda\}|N} \sum_{i=1}^{N} \sum_{\{\lambda\}} \left(T_i(\lambda, p) - T_i^{\text{meas}}(\lambda)\right)^2}.$$
(3)

Здесь $T_i^{\text{meas}}(\lambda)$, $i = 1, \ldots, N$ — все спектры, измеренные за время напыления слоя, $T_i(\lambda, p)$ — рассчитанные спектры напыляемого слоя, соответствующие i-му экспериментальному спектру, p — набор параметров модели.

В следующем разделе мы проводим сравнение результатов решения обратной задачи с помощью локального и нелокального алгоритмов анализа данных. Для проведения этого сравнения нам понадобятся также значения текущего функционала невязки, который строится строится аналогично функционалу (2) на основе *i*-го экспериментального спектра. Заметим, что в соответствии с (3) квадрат нелокального функционала невязки совпадает с усредненным значением квадратов всех текущих функционалов невязки.

Еще одним важным фактором, который необходимо учитывать при решении обратной задачи, является возможность наличия систематических ошибок в данных измерений. Такие ошибки связаны с неточностью калибровки спектрофотометрической аппаратуры, и они оказывают сильное негативное влияние на определение параметров тонких слоев [10]. На рис. 2 показана разность между первым измеренным спектром коэффициента пропускания слоя (это первый спектр на рис. 1) и теоретически рассчитанным коэффициентом пропускания в начале напыления слоя. Первое измерение спектра производится непосредственно перед началом напыления, и поэтому теоретический коэффициент пропускания совпадает с коэффициентом пропускания чистой подложки, параметры которой известны с очень высокой точностью. Рис. 2 показывает, что в измеренных данных, наряду со случайной ошибкой измерений, вызывающей осцилляции кривой на этом рисунке, присутствует еще и систематическая ошибка измерений. Последняя может быть представлена как гладкая аппроксимация найденной разности.

Очевидно, что систематическая ошибка может зависеть от длины волны и может изменятся в про-



Рис. 2. Разность между измеренным и теоретически рассчитанным коэффициентами пропускания в начале напыления первого слоя; сплошная кривая — гладкая аппроксимация данной разности (систематическая ошибка измерений)



Рис. 3. Значения текущего функционала невязки в процессе напыления слоя, рассчитанные в рамках двухпараметрической (синие кривые) и трехпараметрической (красные кривые) моделей с использованием локального (а) и нелокального (б) алгоритмов

цессе измерений. Однако попытка описания ее многопараметрической зависимостью может привести к дополнительной неустойчивости решения обратной задачи. Поэтому мы рассматриваем два простейших подхода к ее учету. Первый из них состоит в коррекции всех измеренных данных на основе сравнения первого спектра с теоретически рассчитанным коэффициентом пропускания подложки. Проведем аппроксимацию представленной на рис. З разности полиномом второй степени и используем полученную зависимость $\sigma_{\rm pre}^{\rm syst}(\lambda)$ как систематическую ошибку. Далее проведем коррекцию всех измеренных данных данных для локального и нелокального алгоритмов как

$$T_{\text{end}}^{\text{meas}}(\lambda) \to T_{\text{end}}^{\text{meas}}(\lambda) + \sigma_{\text{pre}}^{\text{syst}}(\lambda) ,$$

$$T_{i}^{\text{meas}}(\lambda) \to T_{i}^{\text{meas}}(\lambda) + \sigma_{\text{pre}}^{\text{syst}}(\lambda) .$$

Второй подход состоит в введении в оба алгоритма дополнительного неизвестного параметра $\sigma^{\rm syst}$. При этом измеренные спектры в выражениях (2) и (3) изменяются следующим образом:

$$T_{\text{end}}^{\text{meas}}(\lambda) \to T_{\text{end}}^{\text{meas}}(\lambda) + \sigma^{\text{syst}}$$
$$T_i^{\text{meas}}(\lambda) \to T_i^{\text{meas}}(\lambda) + \sigma^{\text{syst}}$$

В соответствии с этим в функционалах невязки появляется дополнительный неизвестный параметр:

$$F_{\text{loc}}(p) \to F_{\text{loc}}(p, \sigma^{\text{syst}}),$$

$$F_{\text{nonloc}}(p) \to F_{\text{nonloc}}(p, \sigma^{\text{syst}})$$

2. РЕЗУЛЬТАТЫ ЧИСЛЕННЫХ РАСЧЕТОВ И ВЕРИФИКАЦИЯ ПОЛУЧЕННЫХ РЕЗУЛЬТАТОВ

В данном разделе подробно рассмотрена только та часть полученных результатов, которая является наиболее важной для понимания связи между выбором модели слоя и используемыми для определения параметров слоя экспериментальными данными и алгоритмами их обработки. Остальные результаты кратко характеризуются при обсуждении представленных в табл. 1 и 2 данных. В табл. 1 приведены данные, полученные с помощью локального алгоритма для двух- и трехпараметрических моделей слоя с использованием дополнительного неизвестного параметра σ^{syst} . В табл. 2 приведены данные, полученные при использовании нелокального алгоритма. Помимо полученных значений параметров модели, в таблицах приведены также найденные значения параметра σ^{syst} и достигнутые при минимизации значения соответствующих функционалов невязки.

Обсуждение полученных результатов мы начнем с данных, полученных при использовании трехпараметрических моделей слоя. При этом для оценки достоверности найденных значений параметров надо в первую очередь использовать имеющуюся априорную информацию об искомых параметрах модели.

Напомним, что планировавшаяся при напылении толщина слоя равна 68.11 нм. Наиболее близкой к этому значению является толщина слоя, найденная с помощью локального алгоритма в рамках трехпараметрической модели. Однако значения двух других параметров полностью противоречат априорной информации. Найденное значение систематической

Таблица 1. Параметры моделей, найденная систематическая ошибка измерений и значение локального функционала невязки, полученные с использованием локального алгоритма

Число параметров	A	δ , %	d, нм	$\sigma^{\rm syst}$, %	$F_{\rm loc}$
модели					
2	2.072	0.00	70.04	-0.13	0.0799
3	2.120	-29.76	68.46	-1.34	0.0491

Таблица 2. Параметры моделей, найденная систематическая ошибка измерений и значение нелокального функционала невязки, полученные с использованием **нелокально**-

го алгоритма

Число параметров	A	$\delta, \%$	d, нм	$\sigma^{ m syst}$, %	$F_{\rm nonloc}$
модели					
2	2.051	0.00	72.18	0.8015	0.3998
3	2.044	-3.84	70.97	0.5111	0.2263



Рис. 4. Разность между положениями экстремумов измеренного коэффициента пропускания и теоретически рассчитанного в рамках трехпараметрической модели слоя коэффициента пропускания в случае использования локального (а) и нелокального (б) алгоритмов

ошибки имеет противоположный знак по сравнению с тем, который следует ожидать исходя из рис. 2. Полученное значение степени неоднородности на порядок превышает типичные значения этого параметра, получаемые при напылении Nb₂O₅ [8]. Вместе с тем значения параметров σ^{syst} и δ , найденные в рамках трехпараметрической модели с помощью нелокального алгоритма, находятся в хорошем соответствии с имеющимися данными.

Дополнительная проверка достоверности результатов, получаемых в рамках трехпараметрической модели слоя с помощью локального и нелокального алгоритмов, может быть проведена путем сравнения значений текущего функционала невязки (см. разд. 1), рассчитанных на основании данных о найденных параметрах слоя. Красные кривые на рис. 3 показывают эти значения, рассчитанные в рамках данной модели. В случае локального алгоритма (рис. 3, a) очень большие значения невязки между измеренными и теоретическими спектрами для большинства измерений, полученных во время напыления слоя, свидетельствуют о неадекватности полученных результатов.

Еще одна физически обоснованная проверка достоверности результатов может быть проведена путем исследования соответствия положений экстремумов измеренных и расчетных спектров коэффициента пропускания растущего слоя. Экстремумы измеряемого спектра появляются в рассматриваемой спектральной области от 400 до 1000 нм только при достаточной толщине напыляемого слоя. В нашем случае мы можем проводить сравнение положения экстремумов только начиная со 135-го номера измерений (см. рис. 4). Положение экстремумов на волновой шкале определяется оптической толщиной слоя, и если параметры слоя определены верно, то следует ожидать совпадения положений экстремумов измеренных и расчетных кривых. Как следует из рис. 4, соответствие экстремумов в случае нелокального алгоритма гораздо лучше, чем в случае локального алгоритма. При этом наблюдаемое на рис. 4, б относительно небольшое несовпадение экстремумов

в значительной степени связано с неточностью определения положения экстремума для зашумленных измеренных данных.

Таким образом, все проведенное выше обсуждение однозначно свидетельствует о достоверности данных, получаемых в рамках трехпараметрической модели с помощью нелокального алгоритма, и о неправомерности использования данной модели в случае локального алгоритма.

Проведем теперь сравнение результатов, полученных с помощью нелокального алгоритма в рамках двух- и трехпараметрических моделей слоя. Сравнение кривых текущего функционала невязки на рис. 3, б свидетельствует о том, что результаты трехпараметрической модели более точно соответствуют измеренным данным в течение всего процесса напыления. Несомненно, это связано с включением в число искомых параметров модели степени неоднородности, учитывающей изменение показателя преломления в ходе напыления слоя. О важности включения данного параметра говорит и резкое уменьшение значения нелокального функционала при переходе от двухпараметрической модели к трехпараметрической модели (см. последний столбец табл. 2). Еще одним свидетельством в пользу трехпараметрической модели является лучшее соответствие найденной систематической ошибки ее априорной оценке на рис. 2.

Для проверки необходимости учета в случае нелокального алгоритма систематической ошибки в данных измерений были проведены расчеты без ее учета и с предварительной коррекцией измерений с помощью априорно рассчитанной зависимости $\sigma_{\rm pre}^{\rm syst}(\lambda)$ (см. конец предыдущего раздела). В первом случае полученные значения нелокального функционала невязки почти в два раза выше приведенных в табл. 2, что свидетельствует о важности учета систематической ошибки. Во втором случае полученные результаты оказываются очень близкими к результатам табл. 2.

В заключение рассмотрения полученных результатов вернемся еще раз к обсуждению результатов, полученных с помощью локального алгоритма. Рис. За показывает, что при использовании двухпараметрический модели слоя значения текущего функционала невязки в процессе напыления слоя существенно меньше, чем в случае трехпараметрической модели. Это — свидетельство большей адекватности первой. Отметим, что и параметры A и d, найденные локальным алгоритмом в рамках двухпараметрической модели, находятся в лучшем соответствии с результатами, полученными нелокальным алгоритмом. В случае использования локального алгоритма без коррекции измеренных данных в рамках двухпараметрической модели получаются следующие результаты: A = 2.067, d = 70.21 нм, т.е. соответствие с результатами последней строки табл. 2 еще улучшается. Таким образом, при использовании локального алгоритма и ограниченного набора входных данных оправданным является применение лишь простейшей двухпараметрической модели слоя. Увеличение числа искомых параметров приводит к ухудшению результатов для основных, наиболее значимых параметров.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Повышение точности определения параметров первого слоя многослойного оптического покрытия имеет определяющее значение для повышения точности контроля процесса напыления всего покрытия в целом. В данной работе мы предлагаем использовать для этих целей нелокальный алгоритм анализа экспериментальных данных, использующий данные всех измерений, производимых в процессе напыления слоя. Возможности нелокального алгоритма демонстрируются на примере исследования параметров первого слоя покрытия, образованного на основе оксида ниобия, являющегося одним из основных пленкообразующих материалов с высоким показателем преломления.

В работе показано, что при использовании нелокального алгоритма удается надежно определить изменение показателя преломления первого слоя от заданной на основе предварительных расчетов дисперсионной зависимости, толщину этого слоя, а также степень неоднородности слоя, учитывающую изменение показателя преломления по толщине напыляемого слоя. Показана необходимость алгоритмического учета возможных систематических ошибок в данных измерений.

Проведено сравнение нелокального алгоритма с традиционно использующимся локальным алгоритмом, основанном на анализе лишь последнего измеренного в процессе напыления спектра. Показано, что в случае локального алгоритма возможно использование лишь простейшей двухпараметрической модели исследуемого слоя, а попытка поиска большего числа модельных параметров приводит к получению физически неадекватных результатов.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда (проект № 21-11-00011)

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Piegari A., Flory F. // Optical Thin Films and Coatings. 2nd edition. Woodhead Publishing, Cambridge, UK, 2018.
- Tikhonravov A. V., Trubetskov M.K //Appl. Opt. 2012.
 51. P. 7319
- 3. *Tikhonravov A., Trubetskov M., Amotchkina T. //* Optical Thin Films and Coatings / Ed. by Piegari A., Flory F. Woodhead, Cambridge, 2nd ed., 2018. P. 65.
- 4. *Macleod H.A.* // Thin-Film Optical Filters, 4th ed. (Taylor & Francis, 2010).
- 5. *Tikhonravov* A. V., *Trubetskov* M. K., *Amotchkina T. V.* // Appl. Opt. 2006. **45**. P. 7026.
- Zhupanov V., Kozlov I., Fedoseev V. et al. // Appl. Opt. 2017. 56. P. 30.
- Tikhonov A. N., Goncharsky A. V., Stepanov V. V., Yagola A. G. // Numerical methods for the solution of illposed problems. — Springer Science + Business Media, Dordrecht, 2013. P. 1.
- 8. *Tikhonravov A. V., Trubetskov M. K., Amotchkina T. V.* et al. // Appl. Opt. 2011. **50**. N 9. P. 75.
- 9. Schröder H. // Ann. Phys. 1941. 39. P. 55.
- 10. *Tikhonravov A. V., Trubetskov M.K., Kokarev M.A.* et al. // Appl. Opt. 2002. **41** N 13. P. 2555.

Determination of the Parameters of the First Coating Layer Using Broadband Optical Monitoring of the Deposition Process

T. F. Isaev^{1,2}, Iu. S. Lagutin^{1,2,3}, A. A. Lagutina^{1,2,3,a}, D. V. Lukyanenko^{1,2,3}, O. F. Prosovskiy⁴, A. V. Tikhonravov^{2,3}, A. G. Yagola^{1,2}

¹Faculty of Physics, Moscow State University. Moscow, 119991 Russia
 ²Research Computing Center, Lomonosov Moscow State University. Lomonosov Moscow 119991, Russia
 ³Moscow Center of Fundamental and Applied Mathematics. Moscow 119234, Russia
 ⁴JSC ORPE «Technologiya». Obninsk Kaluga Region 249031, Russia
 E-mail: alagutina.math@gmail.com

The accuracy of the determination of the parameters of the first coating layer is critical for the accuracy of monitoring of the entire deposition of optical coatings. The paper presents a nonlocal algorithm for the analysis of optical monitoring data, which makes it possible to compose a more accurate model of the layer. The capabilities of the new nonlocal algorithm are demonstrated by studying the parameters of the first coating layer formed by niobium oxide, which is one of the main film-forming materials with a high refractive index.

Keywords: optical coatings, broadband optical monitoring, layer model, data analysis algorithms. PACS: 42.25.Hz.

Received 08. June 2021.

English version: Moscow University Physics Bulletin. 2021. 76, No. 5. Pp. 356-362.

Сведения об авторах

- 1. Исаев Темур Фуркатович аспирант; тел.: (495) 939-10-33, e-mail: temurisaev@gmail.com.
- 2. Лагутин Юрий Сергеевич аспирант; тел.: (495) 939-10-33, e-mail: lagutin.math@gmail.com.
- 3. Лагутина Алена Алексеевна аспирант; тел.: (495) 939-10-33, e-mail: lagutina.math@gmail.com.
- 4. Лукьяненко Дмитрий Витальевич канд. физ.-мат. наук, доцент; тел.: (495) 939-10-33, e-mail: lukyanenko@physics.msu.ru.
- 5. Просовский Олег Федорович нач. лаборатории оптических покрытий АО ОНПП «Технология»; тел.: (484) 399-68-68, e-mail: poi@mail.ru.
- 6. Тихонравов Александр Владимирович доктор физ.-мат. наук, профессор; тел.: (495) 939-54-24, e-mail: tikh@srcc.msu.ru.
- 7. Ягола Анатолий Григорьевич доктор физ.-мат. наук, профессор; тел.: (495) 939-10-33, e-mail: yagola@physics.msu.ru.