

К. А. Лукин, Д. Н. Татьянако, А. Б. Пих, О. В. Земляный
 Институт радиофизики и электроники им. А. Я. Усикова НАН Украины
 12, ул. Акад. Проскуры, Харьков, 61085, Украина
 E-mail: lukin.konstantin@gmail.com

ИЗМЕРЕНИЕ ТОЛЩИН ОПТИЧЕСКИ ПРОЗРАЧНЫХ СЛОИСТЫХ СТРУКТУР МЕТОДОМ СПЕКТРАЛЬНОЙ ИНТЕРФЕРОМЕТРИИ

В работе представлены результаты применения метода спектральной интерферометрии оптического диапазона для измерения толщин тонких пленок. Аналитически и экспериментально проанализирован спектр суммарного излучения на выходе волоконно-оптического интерферометра Фабри–Перо, который формируется за счет отражений широкополосного излучения от многослойных структур, в том числе и для частного случая двух отражений, когда объектом исследования являются тонкие пленки. Выделены информативные компоненты спектра, соответствующие расстояниям до отражающих поверхностей. Результаты экспериментов, которые проводились с использованием широкополосных светодиодных источников оптического излучения, находятся в полном соответствии с теоретическими выводами. Разработан программный инструментальный с графическим интерфейсом пользователя, предназначенный для обработки и визуализации данных, полученных экспериментально. Полученные в работе результаты позволят улучшить характеристики измерительного оборудования в медицине, профилометрии, а также создавать эталонные средства измерений в метрологии. Ил. 5. Библиогр.: 19 назв.

Ключевые слова: метод спектральной интерферометрии, двойной спектральный анализ, вторичный спектр, шумовая радиолокация, светодиод, тонкие пленки, волоконно-оптический интерферометр.

В отделе нелинейной динамики электронных систем Института радиофизики и электроники им. А. Я. Усикова НАН Украины интенсивно развивается шумовая радарная технология в различных диапазонах частот электромагнитного спектра: от единиц гигагерц до инфракрасного и оптического диапазонов [1–4]. При этом в шумовых радарах и измерителях расстояний, основанных на применении широкополосных стационарных случайных сигналов, помимо основного метода – корреляционного приема отраженных сигналов [1, 3, 4], используется и метод спектральной интерферометрии (двойной спектральный анализ), который также пригоден для оценки расстояний до одного или нескольких отражателей [1–11]. Этот метод основан на линейном суммировании зондирующего и отраженных от целей (объектов) сигналов и извлечении информации о них из суммарного сигнала в частотной области [1–11]. Спектральная интерферометрия лежит в основе разработки методов и приборов для измерения микро-расстояний, в том числе толщин тонких оптически прозрачных пленок и слоистых структур, также развиваемых в отделе нелинейной динамики электронных систем [12–15]. При этом в качестве источников оптического излучения используются сверхяркие светодиоды, что значительно снижает стоимость разрабатываемых приборов по сравнению с существующими приборами аналогичного назначения, например, низкокогерентными оптическими томографами, в которых применяются суперлюминесцентные диоды [16].

Целью исследований, представленных в данной работе, является развитие методов спектральной интерферометрии в оптическом диапазоне длин волн с применением двойного спектрального анализа для измерения толщин оптиче-

ски прозрачных слоистых структур и, в частности, толщин наборов оптически прозрачных пленок.

1. Метод спектральной интерферометрии (двойная спектральная обработка). В экспериментах с использованием спектральной интерферометрии оптического диапазона, в которых в качестве регистрирующего устройства на выходе интерферометра используется спектрометр, для дальнейшего анализа доступен лишь спектр мощности выходного сигнала, который представляет собой сумму отражений опорного сигнала от слоев исследуемой структуры. В данной работе представлены результаты по извлечению информации о расстояниях до слоев оптически прозрачных пленок путем применения метода двойного спектрального анализа.

Рассмотрим нормальное падение излучения на оптически прозрачную структуру, которая состоит из слоев с N отражающими границами между слоями. При прохождении излучения через такую структуру появляется N отраженных сигналов, каждый из которых запаздывает относительно падающего излучения на время, пропорциональное расстоянию от точки входа излучения в структуру до отражающей границы. Аналогичная модель рассмотрена в работе [5], где показано, что для случая, когда разность хода лучей при отражении излучения, представляющего собой узкополосный, стационарный, эргодический случайный процесс со спектром мощности $W_x(\omega)$, от любой пары границ значительно больше длины когерентности источника излучения, спектр мощности полного отраженного сигнала имеет следующий вид:

$$W_{\Sigma}(\omega) = W_x(\omega) \sum_{k=1}^N \sum_{j=1}^N q_k q_j \cos(\omega(\tau_k - \tau_j)), \quad (1)$$

где q_k , q_j , τ_k и τ_j – коэффициенты отражения и полные времена прохождения излучения соответственно для k -й и j -й границы; k и j – номера границы раздела пленок.

Таким образом, спектр мощности полного отраженного сигнала в результате отражений сигнала от слоев исследуемой структуры, помещенной в измерительном плече интерферометра, приобретает периодическую неравномерность с частотами, определяемыми относительными разностями задержек сигналов во времени. На этом физическом принципе и основан способ получения информации о соответствующих этим задержкам разностях путей прохождения до отражающих поверхностей с помощью вычисления преобразования Фурье (нахождение вторичного спектра) от функции, определяемой формулой (1). Это составляет суть метода спектральной интерферометрии (двойной спектральной обработки), основанного на явлении интерференции спектров стационарных случайных сигналов, которая наблюдается не в амплитудной (как в случае частично когерентных сигналов), а в частотной области. Впервые этот эффект в радиотехнике описан В. С. Троицким [17], а в более общей форме и применительно к задачам радиолокационных измерений – Дж. Л. Пуарье [5].

Такая методика широко применяется в современной шумовой радиолокации. В работах [1, 2, 5, 10–15] рассмотрен способ построения шумового радиолокатора, в котором при определении координат цели применяются стационарные случайные сигналы и двойная спектральная обработка суммы излучаемого сигнала и сигнала, отраженного от цели. Известно [1, 5, 10], что при отражении стационарного случайного сигнала от одиночной точечной цели функция автокорреляции суммарного сигнала имеет вид:

$$R_{\Sigma}(\tau) = 2R_x(\tau) + R_x(\tau + \tau_0) + R_x(\tau - \tau_0), \quad (2)$$

где $R_x(\tau)$ – автокорреляционная функция опорного сигнала; τ_0 – время распространения сигнала до цели и обратно.

Для суммарного стационарного случайного сигнала с автокорреляционной функцией (2) в спектральной области наблюдается интерференция спектральных компонент при условии, что разность хода между опорным и отраженным сигналами значительно превышает длину когерентности: $\Delta L > l_c = c/\Delta f$, где $\Delta f = f_{\max} - f_{\min}$ – полоса частот сигнала. При этом форма усредненного спектра приобретает периодическую неравномерность, шаг которой по частоте обратно пропорционален разности хода сигналов. При условии равенства амплитуд опорного и отраженного сигналов такой спектр мощности определяется следующим образом [5]:

$$W_{\Sigma}(\omega) = 2W_x(\omega)[1 + \cos(\omega\tau_0)], \quad (3)$$

где $W_x(\omega)$ – спектр мощности опорного сигнала. Подробно этот эффект рассмотрен, например, в работах [1, 2, 5, 9–11, 17].

Рассмотрим теперь более общий случай, когда в измерительном плече интерферометра размещена слоистая структура, имеющая две отражающие поверхности. Обозначим коэффициенты отражения от границ «торец волокна – первая поверхность», «первая поверхность – вторая поверхность», которые являются действительными числами, соответственно q_r , q_1 , q_2 , а времена распространения излучения от выходной апертуры источника до этих поверхностей обозначим соответственно τ_r , τ_1 и τ_2 . Кроме того, полагаем, что затухание излучения при распространении внутри прозрачных слоев пренебрежимо мало.

Тогда автокорреляционная функция суммарного сигнала

$$R_{\Sigma}(\tau) = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_0^T x_{\Sigma}(t) x_{\Sigma}^*(t - \tau) dt \quad (4)$$

на выходе рассматриваемого интерферометра, т. е. для случая суммирования трех случайных стационарных сигналов, принимает следующий вид:

$$\begin{aligned} R_{\Sigma}(\tau) = & (q_r^2 + q_1^2 + q_2^2)R_x(\tau) + \\ & + q_r q_1 [R_x(\tau + \tau_r - \tau_1) + R_x(\tau - \tau_r + \tau_1)] + \\ & + q_r q_2 [R_x(\tau + \tau_r - \tau_2) + R_x(\tau - \tau_r + \tau_2)] + \\ & + q_1 q_2 R_x(\tau + \tau_1 - \tau_2) + q_1 q_2 R_x(\tau - \tau_1 + \tau_2). \end{aligned} \quad (5)$$

Используя теорему Хинчина–Винера, получим спектр мощности суммарного сигнала с автокорреляционной функцией (5):

$$\begin{aligned} W_{\Sigma}(\omega) = & W_x(\omega)[q_r^2 + q_1^2 + q_2^2 + \\ & + 2q_r q_1 \cos(\omega(\tau_r - \tau_1)) + 2q_r q_2 \cos(\omega(\tau_r - \tau_2)) + \\ & + 2q_1 q_2 \cos(\omega(\tau_1 - \tau_2))], \end{aligned} \quad (6)$$

где $W_x(\omega)$ – спектр мощности излучаемого сигнала, то есть сигнала в опорном плече интерферометра. По временам распространения излучения τ_r , τ_1 и τ_2 можно однозначно рассчитать расстояние между торцом оптического волокна и каждой отражающей поверхностью.

Таким образом, огибающая спектра мощности $W_{\Sigma}(\omega)$ суммарного сигнала на выходе интерферометра содержит гармонические составляющие, в которых заключена информация о взаимных задержках между суммируемыми сигналами, а также коэффициентах отражения от поверхностей. Формальное рассмотрение спектра мощности $W_{\Sigma}(\omega)$ как периодической функции аргумента ω позволяет определить периоды входящих в нее гармонических составляющих с по-

мощью преобразования Фурье, получить информацию о временах распространения оптического излучения до слоев исследуемой структуры и, следовательно, измерить расстояния L_j до отражающих поверхностей по формуле

$$L_j = \frac{c\tau_j}{2n}, \quad (7)$$

где n – показатель преломления вещества исследуемой структуры. Процедура получения функциональной зависимости $W_\Sigma(\omega)$ в виде электрического сигнала без переноса спектра оптического сигнала в основной диапазон частот описана в разд. 3.

2. Модель и численный эксперимент.

Модель процессов отражения от слоев многослойной структуры, помещенной в измерительное плечо волоконно-оптического интерферометра Фабри–Перо, выполнялась в программной среде пакета *MATLAB*. Реализации случайных сигналов

рассчитывались по алгоритму *MT19937*, который встроен в программную библиотеку *MATLAB* и на сегодняшний день признан одним из лучших, так как превосходит по скорости многие стандартные генераторы псевдослучайных чисел, позволяет получать числовые последовательности с очень большим периодом и хорошими корреляционными свойствами. Алгоритм, по которому проводилось моделирование, состоит из нескольких частей и включает в себя задание начального значения для генератора и расчет ансамбля реализаций случайного процесса, задание параметров моделируемой структуры (показатель преломления для каждого слоя, геометрия расположения отражающих поверхностей). Разработанная программа позволяет проводить моделирование для любого количества отражающих поверхностей. На рис. 1 показаны результаты моделирования для случаев, когда слоистая структура содержит два (рис. 1, а) и три (рис. 1, б) отражающих слоя.

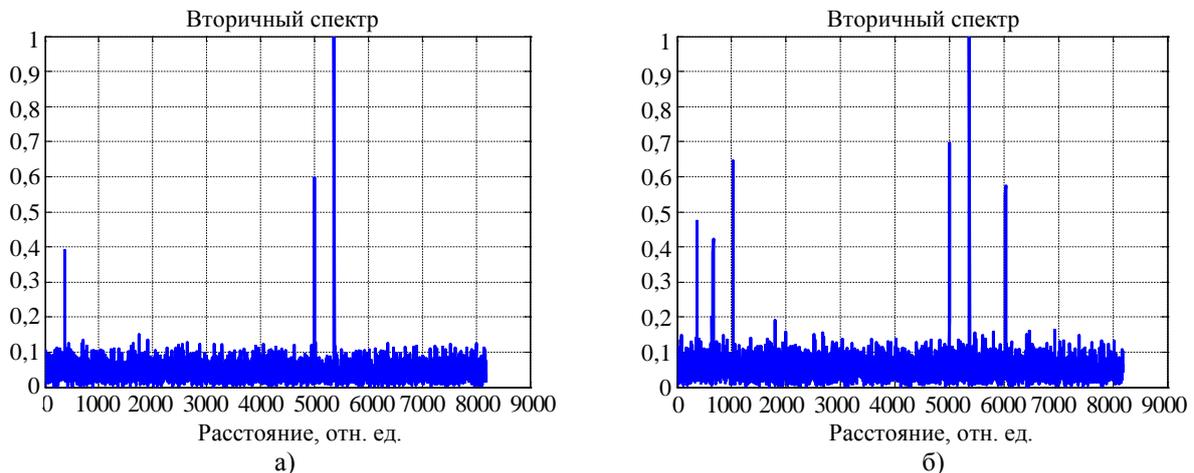


Рис. 1. Результат преобразования Фурье спектра мощности суммарного сигнала (результаты моделирования) при отражении оптического излучения от слоистой структуры: а) для 2-х отражателей; б) для 3-х отражателей

Картина расположения локальных максимумов на вторичных спектрах находится в полном соответствии с формулой (6). На графиках присутствуют отклики от каждого из отражающих слоев, а также их комбинационные составляющие, расположение которых на вторичных спектрах в общем виде определяется разностями $\tau_j - \tau_k$, где $j, k = 0, 1, 2, \dots, N$. Присутствие комбинационных составляющих, количество которых для общего случая N отражений равно $N(N-1)/2$, затрудняет анализ картины отражений, поскольку их появление во вторичных спектрах может быть интерпретировано как отражение от несуществующего слоя. Возникновение этих дополнительных максимумов на комбинационных частотах во вторичных спектрах является недостатком используемого метода обработки

данных, приводящего к неоднозначности измерений. Одним из способов устранения этой неоднозначности является введение дополнительного запаздывания распространения оптического излучения в измерительном плече интерферометра. При этом максимумы, несущие полезную информацию, смещаются в высокочастотную часть вторичного спектра, не изменяя при этом своего взаимного расположения, в то время как комбинационные максимумы остаются в области нижних частот. При проведении эксперимента такое разделение может быть достигнуто расположением исследуемой структуры по отношению к торцу волокна на расстоянии, в несколько раз превышающем разность хода лучей между внешними отражающими поверхностями структуры. Аналогичный способ разделения комбинационных составляющих и информационных пиков путем

введения дополнительной задержки в приемный канал предложен в работе [11].

3. Экспериментальная установка и результаты измерений. При реализации экспериментальной установки для измерения толщины тонких пленок методом спектральной интерферометрии одной из важных задач был выбор широкополосного источника оптического излучения [15]. Традиционно в устройствах для измерения расстояний данным методом применяются суперлюминесцентные диоды (СЛД), а также различные виды ламп (вольфрам-галогеновые и кварцевые лампы) [16, 18]. Это мощные широкополосные полупроводниковые источники оптического излучения, мощность которых соизмерима с мощностью лазеров, а ширина спектра приближается к ширине спектра светодиодов. СЛД удовлетворяют требованиям, предъявляемым к измерениям методом спектральной интерферометрии, но являются дорогостоящими источниками.

Развитие технологий изготовления современных сверхярких светодиодов приближает их характеристики к СЛД. Их мощность излучения достигает мощности излучения СЛД, а ширина спектра превышает ширину спектра СЛД. Это позволило в качестве источника широкополосного излучения в работе применить современный сверхяркий светодиод. В качестве источника оптического излучения использовался недорогой светодиодный источник с оптоволоконным выводом *HFBR-1414Z* компании *Avago Technologies*, предназначенный для применения в оптических телекоммуникациях [13]. Структурная схема экспериментальной установки показана на рис. 2.

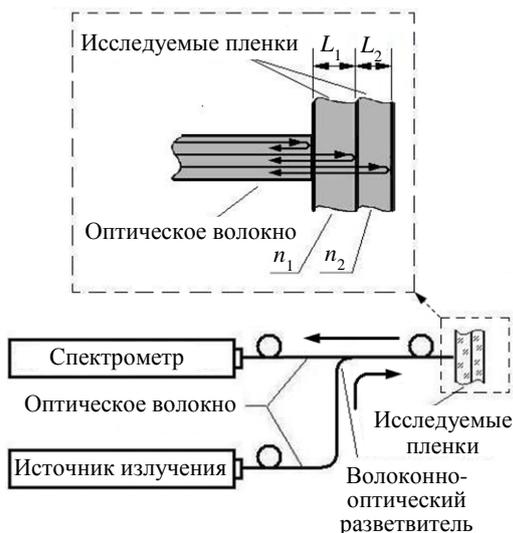


Рис. 2. Структурная схема экспериментальной установки волоконно-оптического интерферометра для измерения толщины прозрачных тонких пленок. L_1 , n_1 и L_2 , n_2 – толщина и показатель преломления первой и второй пленок по ходу луча, соответственно. Линиями со стрелками показано направление распространения оптического излучения

В основе экспериментальной установки лежит низкодобротный волоконно-оптический интерферометр Фабри–Перо, который формируется частично отражающим торцом оптического волокна и поверхностями прижатых к нему исследуемых прозрачных пленок.

Для измерения спектров оптического излучения на выходе интерферометра применялся спектрометр *SP2-USB* компании *Thorlabs* [19]. Его работа состоит в пространственном расщеплении оптического луча на спектральные компоненты с помощью дифракционной решетки и детектировании полученного таким способом излучения в фотодиодной линейке так, что интенсивность излучения каждой спектральной компоненты детектируется отдельным фотодиодом линейки с последующим преобразованием оптического излучения в электрический сигнал.

В эксперименте в качестве образцов для исследования использовались слюдяные пленки разной толщины. Пленки плотно прижимались к торцу оптического волокна с помощью специального юстировочного крепежа.

Излучение в интерферометр поступало от светодиодного источника через волоконно-оптический разветвитель, имеющий высокий уровень изоляции между полюсами («рукавами»), к которым подключены источник излучения и спектрометр.

Излучение от светодиодного источника проходило через волоконно-оптический разветвитель, и часть излучения отражалась от границы торца оптического волокна, а часть выходила из волокна, отражалась от границы между двумя пленками, затем от второй поверхности второй пленки и направлялась обратно в оптическое волокно. Толстыми линиями со стрелками на рис. 2 указано направление распространения лучей в оптическом волокне, а также в области «торец волокна – исследуемые пленки». Далее суммарное отраженное излучение направлялось через оптический разветвитель в спектрометр.

В результате сложения излучения, частично отраженного от торца волокна и от поверхностей исследуемых пленок, наблюдалась интерференция суммарного излучения в спектральной области. При этом отражение от каждой поверхности пленок вносило свою составляющую в результирующий суммарный спектр. Преобразование Фурье полученного таким образом спектра и знание показателей преломления сред распространения n_1 и n_2 (для слюды $n_1 = n_2 = 1,56$) дает представление о расстояниях L_1 и L_2 между поверхностями пленок, т. е. об их толщинах.

В действительности между исследуемыми пленками, а также между пленками и торцом оптического волокна существовал небольшой воздушный зазор, и оптическое излучение отра-

жалось от границ «поверхность пленки – воздух» и «воздух – поверхность пленки». Но этот воздушный зазор был настолько мал, что максимумы, соответствующие этим отражениям на вторичном спектре, сливались друг с другом, т. е. разрешающая способность применяемого измерительного оборудования не позволяла увидеть их раздельно.

Для эффективной обработки экспериментальных данных и визуализации результатов измерений была разработана программа графического интерфейса пользователя в среде *MATLAB*

GUI. Внешний вид главного окна интерфейса представлен на рис. 3.

На верхнем графике (рис. 3) отображается спектр сигнала на выходе интерферометра. Непосредственно над графиком выводится имя считываемого файла. На нижнем графике выводится результат вычисления преобразования Фурье от функции, изображенной на графике сверху. По количеству локальных максимумов и их расположению на данном графике можно определить количество слоев (отражений) в исследуемой структуре и их толщину.

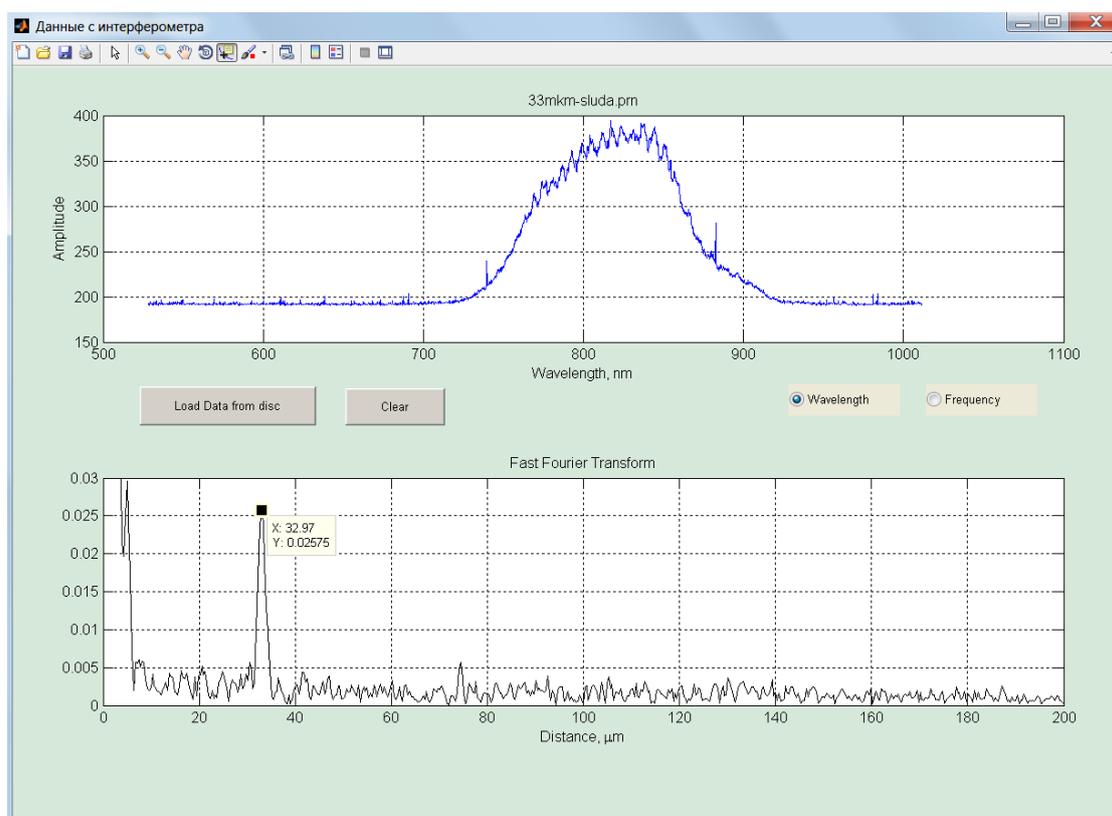


Рис. 3. Общий вид окна графического интерфейса пользователя

В работе использована версия графического интерфейса, которая требует предварительной записи результатов эксперимента на диск компьютера в виде файла с массивами данных. В дальнейшем будет использована предусмотренная разработчиками программного обеспечения спектрометра возможность чтения выходных данных непосредственно из ОЗУ компьютера, что сделает возможным отображение результатов обработки в реальном масштабе времени и автоматизацию процесса измерения расстояний до отражающих поверхностей предложенным методом.

В исследованиях использовались наборы слюдяных пленок толщиной 48 и 28 мкм, а также

48 и 33 мкм. На спектрометре наблюдались спектры суммарного излучения, сформированного набором исследуемых пленок (рис. 4, а и 5, а). Их вторичные спектры показаны на рис. 4, б и 5, б.

Спектры на рис. 4, а и 5, а имеют сложную форму, которая является суперпозицией спектров с многопериодической структурой, образованных в результате отражения от каждой поверхности. Спектры, образованные такими отражателями, представлены, например, в [13, 15].

По вторичным спектрам, полученным в результате преобразования Фурье, примененного к спектрам на рис. 4, а и 5, а, можно судить о структуре набора пленок и их толщине.

Положения максимумов на результирующих графиках вторичных спектров наборов пленок соответствуют расстоянию от торца опти-

ческого волокна до поверхностей пленок, что позволяет определить толщину пленок и их расположение в многослойной структуре.

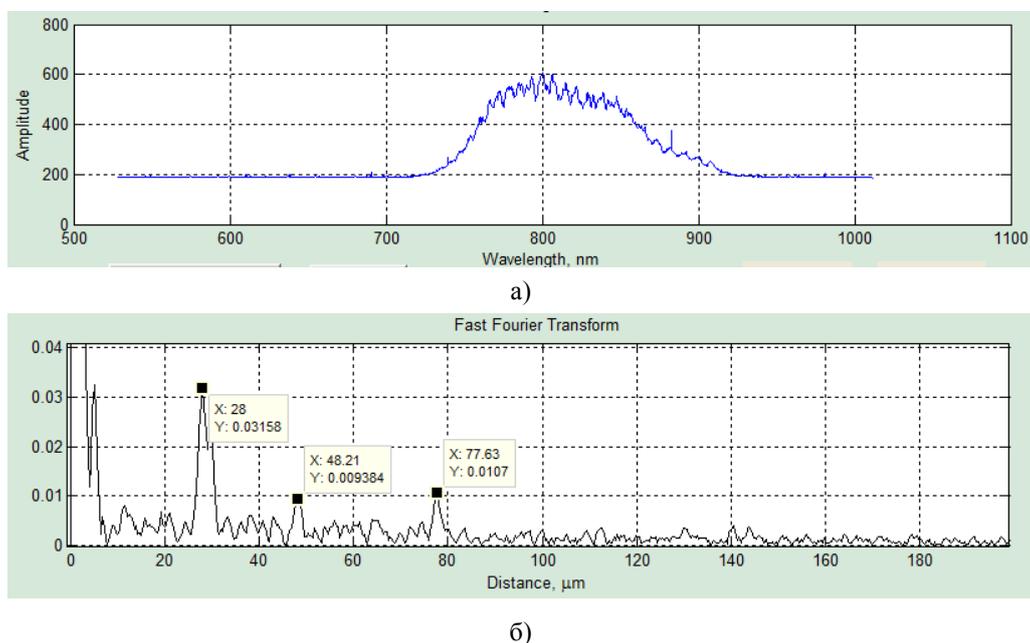


Рис. 4. Спектр (а) и вторичный спектр (б) на выходе интерферометра, образованного набором пленок 48 и 28 мкм

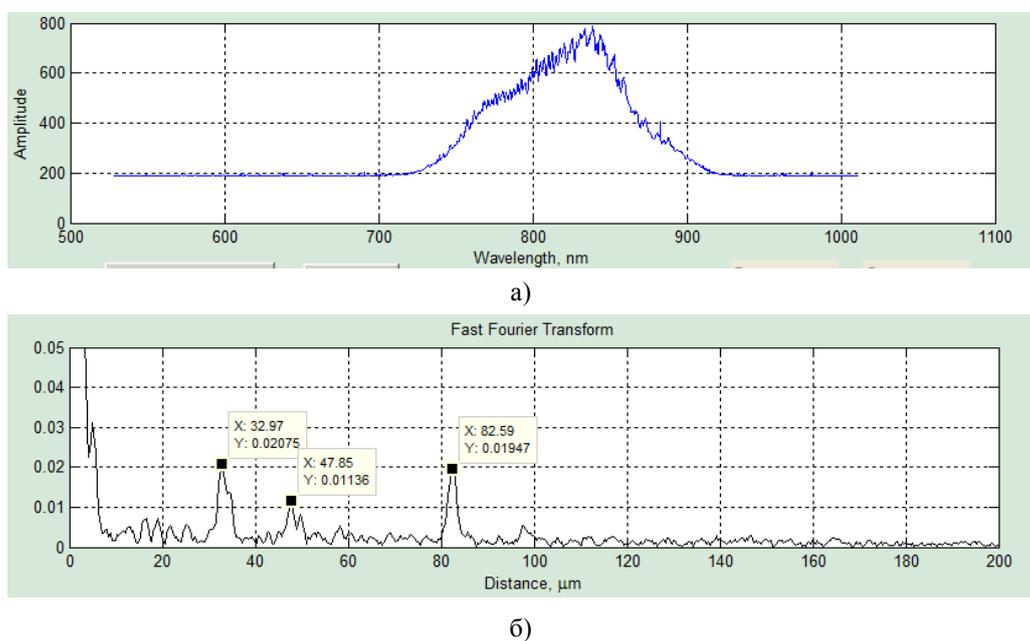


Рис. 5. Спектр (а) и вторичный спектр (б) на выходе интерферометра, образованного набором пленок 48 и 33 мкм

Величина максимума на результирующих графиках вторичных спектров (рис. 4, б и 5, б), соответствующих дальней от торца волокна поверхности второй пленки (по линии движения луча), превышает значение максимума, соответствующего отражению от границы первой и второй пленок. Это обусловлено тем, что пленки пропус-

кают значительную часть оптического излучения. При этом дальняя поверхность второй пленки контактирует с поверхностью, прижимающей пленки к торцу волокна, и все излучение, прошедшее первую и вторую пленки, отражается от границы «дальняя поверхность второй пленки – прижимающая поверхность». Таким образом,

большая часть излучения отражается от границы с этой поверхностью. В результате максимум (рис. 4, б и 5, б), связанный с дальней поверхностью второй пленки, более ярко выражен.

На рассматриваемых вторичных спектрах наблюдается также максимум спектра, положение которого на оси расстояний соответствует разности между толщинами пленок. Физический смысл появления в спектре данного разностного спектра описан выше. Экспериментальная установка на рис. 2 состоит, по сути, из трех интерферометров: «торец волокна – граница первой и второй пленок»; «торец волокна – дальняя поверхность второй пленки»; «ближняя поверхность второй пленки – дальняя поверхность второй пленки». Экспериментальные исследования показали, что коэффициент отражения от торца волокна меньше, чем от поверхностей пленок, поэтому результат спектральной интерференции интерферометров, образованных с участием торца волокна, менее выражен. Соответственно, ярче выражена составляющая спектра, образованная интерференцией от интерферометра «ближняя поверхность второй пленки – дальняя поверхность второй пленки».

Относительное значение границы доверительного интервала измерений толщин исследуемых наборов пленок (48 и 28 мкм; 48 и 33 мкм) при доверительной вероятности 0,95 составило 0,88 %, при этом абсолютное значение равно 0,17 мкм. Такой результат лучше точностных характеристик промышленно выпускаемых приборов. Для сравнения можно привести пример оптического низкокогерентного томографа *OPTOVUE RTVue-100* компании *Optovue, Inc.*, на интернет-сайте которой приведены параметры данного прибора: разрешающая способность равна 5 мкм при глубине сканирования 2,0...2,3 мм.

Выводы. Представленные в работе результаты показывают возможность измерения толщин тонких пленок методом спектральной интерферометрии в оптическом диапазоне с применением светодиодных источников оптического излучения.

Аналитическими методами проанализирован вторичный спектр суммарного излучения на выходе волоконно-оптического интерферометра Фабри–Перо при отражении от многослойных структур, в том числе для частного случая двух отражений, когда объектом исследования являются тонкие пленки; выделены информативные компоненты спектра, соответствующие расстояниям до отражающих поверхностей.

Представлены результаты проведенных измерений толщин наборов из двух оптически прозрачных тонких пленок методом спектральной интерферометрии с использованием широкополосного светодиодного источника оптического

излучения. Результат измерений имеет погрешность, сравнимую с погрешностью подобного измерительного оборудования (томографы, основанные на оптической когерентности и т. п.): относительное значение границы доверительного интервала измерений при доверительной вероятности 0,95 составило 0,88 %, при этом абсолютное значение равно 0,17 мкм.

Сравнительный анализ показал полное соответствие аналитических результатов, результатов численного моделирования и экспериментально полученных данных.

В работе представлен разработанный авторами программный инструментарий с графическим интерфейсом пользователя для обработки и визуализации полученных экспериментальных данных, который значительно упростил обработку результатов эксперимента.

Таким образом, в работе показан и обоснован достаточно точный и недорогой способ измерения толщин оптически прозрачных слоистых структур и наборов тонких пленок. При этом вопрос измерения расстояния сводится к измерению частоты с заданной точностью.

Данный подход пригоден для измерения нанорасстояний при использовании оптических спектрометров с более высокой разрешающей способностью.

Библиографический список

1. Лукин К. А. Шумовая радарная технология. *Радиофизика и электроника*: сб. науч. тр. Ин-т радиофизики и электрон. НАН Украины. Харьков, 1999. Т. 4, № 3. С. 105–111.
2. Lukin K. A., Kulik V. V., Mogyla A. A. Spectral interferometry method and autodyne (self-mixing) effect for noise radar applications. First International Workshop on the Noise Radar Technology: int. conf., (Yalta, 18–20 Sept. 2002): conf. proc. Yalta, Crimea, Ukraine, 2002. P. 179–186.
3. Lukin K. A. Noise Radar Technology: the principles and short overview. *Applied Radio Electronics*. 2005. vol. 4, no 1. P. 4–13.
4. Lukin K. A. Millimeter-Wave Band Noise Radar. *Telecommunications and Radio Engineering*. 2009. vol. 68, N 14. P. 1229–1255.
5. Poirier J. L. Quasi-monochromatic scattering and some possible radar applications. *Radio Science*. 1968. vol. 3, N 9. P. 881–886.
6. Ефимов Б. П., Лукин К. А., Ракитянский В. А. О трансформации спектра стохастических колебаний под действием отражений. *Журнал технической физики*. 1988. Т. 58, вып. 12. С. 2398–2400.
7. Залогин Н. Н., Калинин А. А., Кириллин К. Л., Кислов В. Я., О возможности измерения расстояния до шероховатой поверхности методом спектрального анализа непрерывного шумового сигнала. *Радиотехника и электроника*. 1990. Т. 35, № 3. С. 548–555.
8. Залогин Н. Н., Калинин А. А., Кириллин К. Л. Расчет соотношения сигнал/шум для радиолокационной станции, работающей по методу двойного спектрального анализа шумового сигнала. *Радиотехника и электроника*. 1993. Т. 38, № 2. С. 278–286.
9. Кулик В. В., Лукин К. А., Ракитянский В. А. Модификация метода двойной спектральной обработки шумовых сигналов. *Украинский метрологический журнал*. 1997. № 4. С. 28–32.

10. Могила А. А., Лукин К. А., Кулик В. В. Статистическая погрешность измерения расстояния методом спектральной интерферометрии. *Радиофизика и электроника*: сб. науч. тр. Ин-т радиофизики и электрон. НАН Украины. Харьков, 2000. Т. 5, № 1. С. 163–170.
11. Калинин В. И. Сверхширокополосная радиолокация с двойной спектральной обработкой шумовых сигналов. *Радиотехника*. 2005. № 3. С. 25–35.
12. Lukin K. A., Machekhin Yu. P., Danailow M. B., and Tatyanko D. N. Application of the Spectral Interferometry Method for Micro- and Nanodistance Measurement. *Telecommunications and Radio Engineering*. 2011. vol. 70, N 17. P. 1579–1591.
13. Tatyanko D., Lukin K., Pikh A. Application of Optical Spectral Interferometry for Thin Film Thickness Measurement. *9th Int. Kharkiv Symp. on Physics and Engineering of Microwaves, Millimeter and Submillimeter Waves (MSMW'2016)* (Kharkov, June 20–24, 2016). Kharkov, Ukraine, 2016. CD-ROM. Papers\Session F\7.pdf.
14. Lukin K. A., Danailow M. B., Machekhin Yu. P., and Tatyanko D. N. Nano-distance measurements using spectral interferometry based on light-emitting diodes. *Applied Radio Electronics*. 2013. vol. 12, N 1. P. 166–171.
15. Лукин К. А., Татыанко Д. Н., Земляный О. В., Пих А. Б. Измерение толщин тонких пленок методом спектральной интерферометрии. *Прикладная радиоэлектроника*. 2016. Т. 15, № 4. С. 350–354.
16. Hlubina P. Dispersive white-light spectral interferometry to measure distances and displacements. *Optics Communications*. 2002. vol. 212, Iss. 1–3. P. 65–70.
17. Троицкий В. С. Флюктуации в нагруженной линии. *Журнал технической физики*. 1955. Т. 25, № 8. С. 1426–1435.
18. Manojlović L. M. A simple white-light fiber-optic interferometric sensing system for absolute position measurement. *Optics and Lasers in Engineering*. 2010. vol. 48, N 4. P. 486–490.
19. THORLABS. SP2-USB – USB 2.0 Spectrometer, 500–1000 nm Spectral Range. URL: <https://www.thorlabs.com/thorproduct.cfm?partnumber=SP2-USB&pn=SP2-USB#5675>
9. KULIK, V. V., LUKIN, K. A., RAKITYANSKY, V. A., 1997. Modification of the method of double spectral processing of the noise signals. *Ukrainskiy metrologicheskii zhurnal*. no. 4, pp. 28–32 (in Russian).
10. MOGYLA, A. A., LUKIN, K. A., KULIK, V. V., 2000. The statistical error of distance measurement by the spectral interferometry method. *Radiofizika i elektronika*. vol. 5, no. 1, pp. 163–170 (in Russian).
11. KALININ, V. I., 2005. Ultra wide band radiolocation with double spectral processing of noise signals. *Radiotekhnika*. no. 3, pp. 25–35 (in Russian).
12. LUKIN, K. A., MACHEKHIN, YU. P., DANAILOW, M. B., AND TATYANKO, D. N., 2011. Application of the Spectral Interferometry Method for Micro- and Nanodistance Measurement. *Telecommunications and Radio Engineering*. vol. 70, no. 17, pp. 1579–1591.
13. TATYANKO, D., LUKIN, K., PIKH, A., 2016. Application of Optical Spectral Interferometry for Thin Film Thickness Measurement. In: *Ninth International Kharkiv Symposium on Physics and Engineering of Microwaves, Millimeter and Submillimeter Waves (MSMW'2016)* Kharkov, Ukraine, June 20–24. [CD]. Papers\Session F\7.pdf.
14. LUKIN, K. A., DANAILOW, M. B., MACHEKHIN, YU. P. and TATYANKO, D. N., 2013. Nano-distance measurements using spectral interferometry based on light-emitting diodes. *Applied Radio Electronics*. vol. 12, no. 1, pp. 166–171.
15. LUKIN, K. A., TATYANKO, D. N., ZEMLYANIY, O. V., PIKH, A. B., 2016. Measuring the thickness of thin films by spectral interferometry method. *Prikladnaya radioelektronika*. vol. 15, no. 4, pp. 350–354 (in Russian).
16. HLUBINA, P., 2002. Dispersive white-light spectral interferometry to measure distances and displacements. *Optics Communications*. vol. 212, Iss. 1–3, pp. 65–70.
17. TROITSKY, V. S., 1955. Fluctuations in the loaded line. *Zhurnal tekhnicheskoy fiziki*. vol. 25, no. 8, pp. 1426–1435 (in Russian).
18. MANOJLOVIĆ, L. M., 2010. A simple white-light fiber-optic interferometric sensing system for absolute position measurement. *Optics and Lasers in Engineering*. vol. 48, no. 4, pp. 486–490.
19. THORLABS. SP2-USB – USB 2.0 Spectrometer, 500–1000 nm Spectral Range [online]. Available from: <https://www.thorlabs.com/thorproduct.cfm?partnumber=SP2-USB&pn=SP2-USB#5675>

REFERENCES

1. LUKIN, K. A., 1999. Noise radar technology. *Radiofizika i elektronika*. Kharkov. vol. 4, no. 3, pp. 105–111 (in Russian).
2. LUKIN, K. A., KULIK, V. V., MOGYLA, A. A., 2002. Spectral interferometry method and autodyne (self-mixing) effect for noise radar applications. *First International Workshop on the Noise Radar Technology*: conf. proc. Yalta, Crimea, Ukraine, Sept. 18–20. P. 179–186.
3. LUKIN, K. A., 2005. Noise Radar Technology: the principles and short overview. *Applied Radio Electronics*. vol. 4, no. 1, pp. 4–13.
4. LUKIN, K. A., 2009. Millimeter-Wave Band Noise Radar. *Telecommunications and Radio Engineering*. Vol. 68, no. 14, pp. 1229–1255.
5. POIRIER, J. L., 1968. Quasi-monochromatic scattering and some possible radar applications. *Radio Science*. vol. 3, no. 9, pp. 881–886.
6. EFIMOV, B. P., LUKIN, K. A., RAKITYANSKY, V. A., 1988. On the transformation of the spectrum of stochastic self-oscillations under the influence of reflections. *Zhurnal tekhnicheskoy fiziki*. vol. 58, no. 12, pp. 2398–2400 (in Russian).
7. ZALOGIN, N. N., KALINKEVICH, A. A., KIRILLIN, K. L., KISLOV, V. Ya., 1990. The possibility of measuring the distance to a rough surface by spectral analysis of continuous noise signal. *Radiotekhnika i elektronika*. vol. 35, no. 3, pp. 548–555 (in Russian).
8. ZALOGIN, N. N., KALINKEVICH, A. A., KIRILLIN, K. L., 1993. The calculation of signal-to-noise ratio for the radar, which uses the method of double spectral analysis of the noise signal. *Radiotekhnika i elektronika*. vol. 38, no. 2, pp. 278–286 (in Russian).

Рукопись поступила 14.12.2016.

K. A. Lukin, D. N. Tatyanko, A. B. Pikh,
O. V. Zemlyaniy

MEASUREMENT OF THICKNESSES OF OPTICALLY TRANSPARENT LAYERED STRUCTURES BY THE SPECTRAL INTERFEROMETRY METHOD

The results of applying the method of spectral interferometry in optical band for measuring the thicknesses of thin films are presented in this paper. We have analyzed analytically and experimentally the spectrum of the total radiation at the output of the fiber optic Fabry-Perot interferometer which is formed by broadband light reflections from the multilayer structures, including the special case of two reflections when the object of study are the thin films. The spectrum informative components corresponding to the distances to the reflective surfaces have been obtained. The results of experiments conducted using broadband LED light sources of optical radiation are in full agreement with the results which were obtained theoretically. A software tool with a graphical user interface for processing and visualization of the experimental results has been developed. The obtained results will help improve the performance of the

measuring equipment in medicine, profilometry, and create standards for metrology.

Key words: spectral interferometry method, double spectral analysis, secondary spectrum, noise radar technology, LED, thin films, fiber optic interferometer.

К. О. Лукін, Д. М. Тат'янка, А. Б. Піх,
О. В. Земляний

ВИМІРЮВАННЯ ТОВЩИН
ОПТИЧНО ПРОЗОРИХ
ШАРУВАТИХ СТРУКТУР
МЕТОДОМ СПЕКТРАЛЬНОЇ ІНТЕРФЕРОМЕТРІЇ

У роботі представлені результати застосування методу спектральної інтерферометрії оптичного діапазону для вимірювання товщини тонких плівок. Аналітично та експериментально проаналізовано спектр сумарного випромінювання

на виході волоконно-оптичного інтерферометра Фабрі–Перо, який формується за рахунок відбиттів ширококутового випромінювання від багатошарових структур, в тому числі і для окремого випадку двох відбиттів, коли об'єктом дослідження є тонкі плівки. Виділено інформативні компоненти спектра, відповідні відстаням до поверхонь, що відбивають. Результати експериментів, які проводилися з використанням ширококугових світлодіодних джерел оптичного випромінювання, перебувають у повній відповідності з результатами, отриманими теоретично. Розроблено програмний інструментарій з графічним інтерфейсом користувача, призначений для обробки і візуалізації отриманих експериментальних результатів. Результати, що були отримані в роботі, дозволять поліпшити характеристики вимірювального обладнання в медицині, профілометрії, а також створювати еталонні засоби вимірювальної техніки в метрології.

Ключові слова: метод спектральної інтерферометрії, подвійний спектральний аналіз, вторинний спектр, шумова радіолокація, світлодіод, тонкі плівки, волоконно-оптичний інтерферометр.