

ИЗМЕРЕНИЕ ТОЛЩИН ТОНКИХ ПЛЕНОК МЕТОДОМ СПЕКТРАЛЬНОЙ ИНТЕРФЕРОМЕТРИИ

К.А. ЛУКИН, Д.Н. ТАТЬЯНКО, О.В. ЗЕМЛЯНЫЙ, А.Б. ПИХ

В работе представлены результаты измерений толщин тонких пленок с использованием широкополосного излучения светодиодов и метода спектральной интерферометрии. Показано, что точность измерений не уступает точности коммерчески доступных оптических низко-когерентных томографов, работа которых основана на том же методе. Применяемый светодиод имеет более широкий спектр и гораздо более низкую стоимость по сравнению с суперлюминесцентными диодами, которые обычно используются в приложениях спектральной интерферометрии. Представлен результат моделирования вторичного спектра сигнала, полученного методом спектральной интерферометрии и пути устранения компонент спектра, не связанных с отображением толщины пленки. В результате работы была подтверждена возможность измерения толщины тонких пленок предложенным методом.

Ключевые слова: спектральная интерферометрия, светодиод, тонкие пленки, волоконно-оптический интерферометр Фабри-Перо.

ВВЕДЕНИЕ

Измерение толщин микро- и нанометрового диапазона оптически прозрачных пленок и слоистых структур является актуальной задачей во многих областях науки, биологии и медицины [1]. Одним из методов, позволяющих осуществлять такие измерения, является метод спектральной интерферометрии [2 – 13]. Этот метод лежит в основе низкокогерентной томографии, применяемой в медицине, в особенности офтальмологии для диагностики заболеваний сетчатки глаза. Ввиду того, что оптическая низкокогерентная томография использует широкополосное оптическое излучение с низкой спектральной плотностью, вероятность повреждения тканей глаза оптическим излучением такой аппаратуры практически сводится к нулю.

Разрешающая способность оптических низкокогерентных томографов, работа которых основана на данном методе, составляет единицы микрометров. Установки, собранные в лабораторных условиях для научных исследований, позволяют достичь разрешающей способности измерений менее микрометра.

Цель работ состоит в демонстрации возможности измерения толщин оптически прозрачных тонких пленок методом спектральной интерферометрии с использованием недорогих низкокогерентных источников оптического излучения.

Метод спектральной интерферометрии (или метод двойной спектральной обработки) состоит в формировании периодического чередования максимумов и минимумов на оси частот спектра, которые являются следствием линейной интерференции гармонических спектральных составляющих широкополосных стационарных случайных сигналов, суммируемых на

выходе интерферометра, при условии, что разность длин плеч интерферометра превышает длину когерентности источника излучения (ИИ) [2 – 13].

В случае одиночного отражателя спектральная плотность мощности $F_{\Sigma}(f, \tau_0)$ сигнала на выходе интерферометра (входе спектрометра) может быть представлена в следующем виде [2 – 5]:

$$F_{\Sigma}(f, \tau_0) = 2F(f) \{1 + \cos(2\pi f \tau_0 + \theta)\}, \quad (1)$$

где f – частота гармонических спектральных составляющих широкополосного спектра оптического излучения; $F(f)$ – спектральная плотность мощности широкополосного оптического излучения светодиода; τ_0 – время распространения излучения до отражателя и обратно; θ – разность фаз между сигналами в плечах интерферометра, зависящая от оптических элементов установки.

Анализ спектра мощности $F_{\Sigma}(f, \tau_0)$ суммарного сигнала опорного и измерительного плеч интерферометра позволяет получить информацию о разности длин плеч, т. е. о дальности L_0 до зондируемого отражателя [2 – 5].

Период чередования максимумов и минимумов в спектре суммарного сигнала, образованных в результате спектральной интерференции, обратно пропорционален величине τ_0 , измерение которой позволяет однозначно оценивать расстояние до отражателя L_0 . Для этого измеряется разность T_f частот f_1 и f_2 , соответствующих положению двух соседних экстремумов (максимумов либо минимумов) спектра мощности (1), и далее находится расстояние из соотношения [2 – 5]:

$$L_0 = \frac{c}{2T_f} = \frac{c}{2(f_1 - f_2)}, \quad (2)$$

где c – скорость света в вакууме.

Если в одно из плеч интерферометра помещена оптически прозрачная пленка, то от ее поверхностей частично отражается излучение. В результате каждого такого отражения появляется сигнал, который участвует в формировании спектра с определенной периодической структурой. Сложение этих сигналов дает на выходе интерферометра излучение со сложным спектральным составом. Преобразование Фурье такого спектра позволяет определить толщину исследуемой пленки.

1. ИЗМЕРЕНИЕ ТОЛЩИНЫ ТОНКИХ ПЛЕНОК

При реализации экспериментальной установки для измерения толщины тонких пленок методом спектральной интерферометрии одной из важных задач был выбор широкополосного источника оптического излучения. Традиционно в устройствах для измерения расстояний данным методом применяются суперлюминесцентные диоды (СЛД), а также различные виды ламп (вольфрам-галогеновые и кварцевые лампы) [12, 13]. 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 приближают 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.

Измерение толщин пленок методом спектральной интерферометрии проводилось с помощью волоконно-оптического интерферометра Фабри-Перо, функциональная схема которого показана на рис. 1.

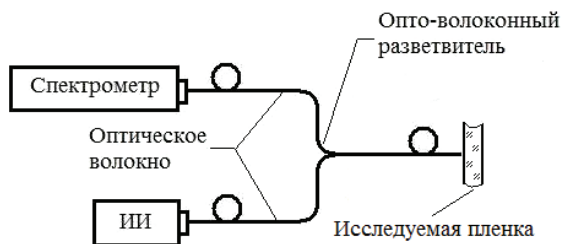


Рис. 1. Волоконно-оптический интерферометр Фабри-Перо для исследования толщин тонких пленок

В качестве источника излучения, ИИ, оптического диапазона (рис. 1) использовался недорогой светодиодный источник с оптоволоконным выводом HFBR-1414Z компании Avago Technologies, предназначенный для применения в оптических телекоммуникациях.

Исследуемая пленка прижималась к торцу волокна (рис. 1). Более детально направление распространения луча в области «торец волокна – исследуемая пленка» схематически показано на рис. 2. Торцевое волокно формирует опорное плечо интерферометра. Исследуемая пленка образует измерительное плечо. Эксперимент показал, что пленка прижималась к торцу волокна не плотно и между ними существовал зазор. Таким образом, часть излучения отражалась от торца волокна, другая часть излучения отражалась от передней, а третья часть - от задней поверхности пленки. Все три отраженных оптических сигнала складывались в оптическом волокне, и суммарный сигнал направлялся в спектрометр через оптоволоконный разветвитель. Таким образом, в рассматриваемой системе было сформировано два измерительных плеча, длины которых равнялись сумме длин опорного плеча и двух расстояний от торца волокна до каждой поверхности пленки.

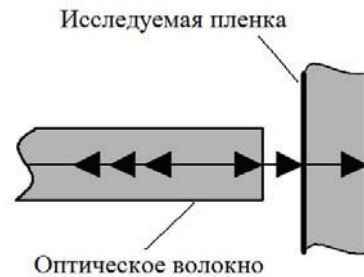


Рис. 2. Направление распространения луча в области «торец волокна – исследуемая пленка»

Для исследований использовались слюдяные пленки толщиной 9 мкм и 20 мкм. На спектрометре наблюдалось суммарное излучение от опорного плеча и плеча, сформированного пленкой. Полученный таким способом спектр показан на рис. 3, а для пленки толщиной 9 мкм и рис. 3, в – для пленки толщиной 20 мкм.

По результатам преобразования Фурье полученных спектров можно судить о толщине исследуемых пленок, что показано на рис. 3, б для пленки толщиной 9 мкм и рис. 3, г – для пленки толщиной 20 мкм.

Положения максимумов на результирующих графиках фурье-преобразования спектров соответствуют расстоянию от торца оптического волокна до поверхностей пленок, т. о. можно определить толщину пленки. Причем, в результате того, что пленка неплотно прилегает к торцу оптического волокна, образуется два измерительных плеча, формируемых двумя поверхностями пленки. В результате на графиках наблюдается два максимума, которые соответствуют расстоянию между торцом волокна и передней (ближней) поверхностью пленки, а также между торцом волокна и задней (дальней) поверхностью пленки. При этом передняя поверхность исследуемых пленок расположена на расстоянии ~7 мкм от торца волокна.

Значения максимума на результирующих графиках фурье-преобразований спектров (рис. 3, б и рис. 3, з), соответствующих задней поверхности, превышает значение максимума соответствующего отражению от передней поверхности. Это обусловлено тем, что передняя поверхность пропускает значительную часть оптического излучения. В то же время задняя поверхность контактирует с поверхностью, при-

жимающей пленку к торцу волокна, и всё излучение, прошедшее переднюю поверхность, отражается от границы «задняя поверхность – прижимающая поверхность». Таким образом, большая часть излучения отражается от границы с этой поверхностью. В результате этого на рис. 3, б и рис. 3, з максимум, связанный с задней поверхностью, более ярко выражен.

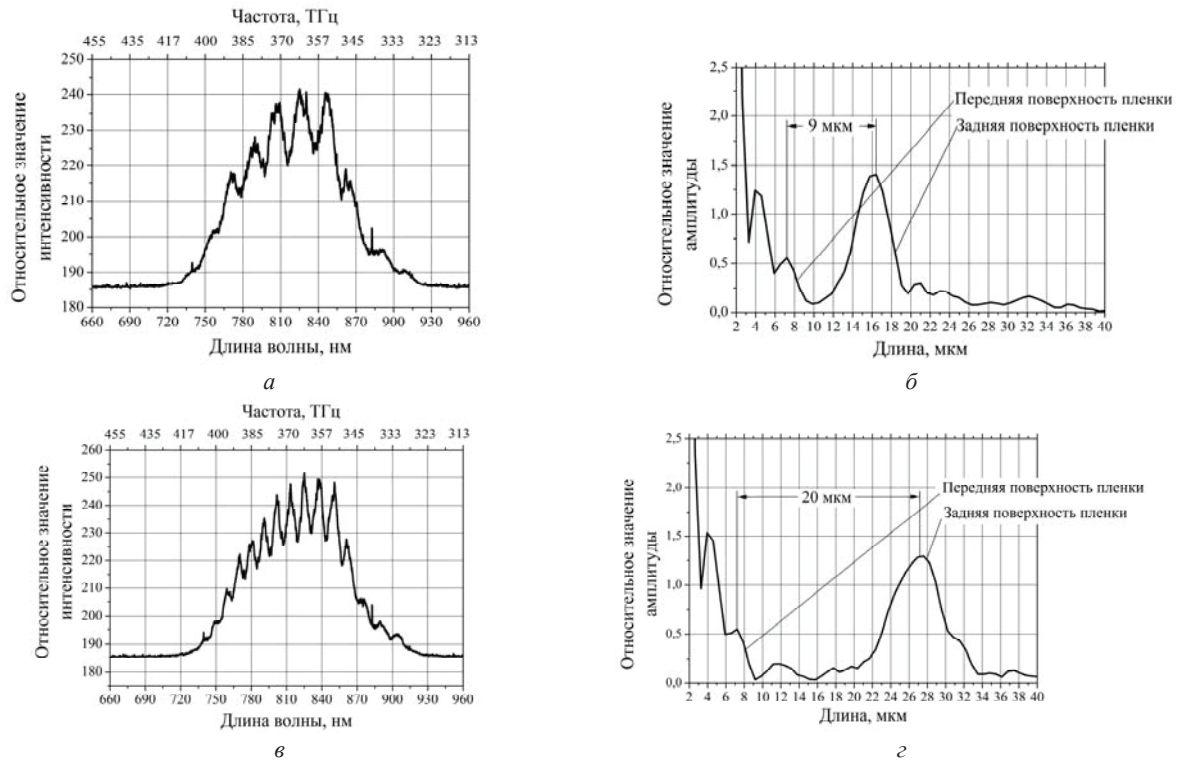


Рис. 3. Спектры на выходе интерферометра при исследовании слюдяных пленок толщиной 9 мкм (а) и 20 мкм (в) и результат нахождения толщины пленки путем преобразования Фурье спектров для пленки толщиной 9 мкм (б) и 20 мкм (з)

Относительное значение границы доверительно-го интервала измерений при доверительной вероятности 0,95 составила 0,85 %, а абсолютное значение составило 0,16 мкм. Такой результат соответствует характеристикам промышленно выпускаемых приборов. Для сравнения можно привести пример оптического низко-когерентного томографа OPTOVUE RTVue-100 компании Optovue, Inc. на интернет-сайте которого приведены параметры данного прибора: разрешающая способность равна 5 мкм, при глубине сканирования 2 мм – 2,3 мм.

2. ЧИСЛЕННЫЙ АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ ЭКСПЕРИМЕНТА

Основной целью анализа результатов эксперимента по измерению толщин тонких пленок методом спектральной интерферометрии было устранение (фильтрация) компонент вторичного спектра, не связанных с отображением толщины пленки. Эти компоненты являются следствием неидеальной формы спектра в эксперименте и носят характер явно выраженных максимумов на вторичном спектре.

На рис. 4 представлен результат численного моделирования спектра суммарного сигнала на выходе

волоконно-оптического интерферометра Фабри-Перо при отражении излучения в измерительном плече от двух поверхностей, в предположении, что разность длин опорного и измерительного плеч интерферометра значительно превышает расстояние между двумя отражающими поверхностями.

Для извлечения информации о положении отражающих поверхностей необходимо применить аппарат преобразования Фурье к функции, представленной на рис. 4. В результате получается вторичный спектр (рис. 5), в котором визуально можно выделить следующие характерные особенности: 1. Максимум на частотах, близких к нулю, который является следствием наличия постоянной составляющей в функции исходного спектра (рис. 4), а также комбинационной составляющей, соответствующей разности задержек при распространении излучения до поверхностей; 2. Локальный максимум на низкой частоте, обусловленный изменением среднего значения функции (рис. 4) при усреднении по одному периоду следования максимумов и минимумов; 3. Максимум на частоте, которая определяется периодом следования максимумов и минимумов в исходном спектре.

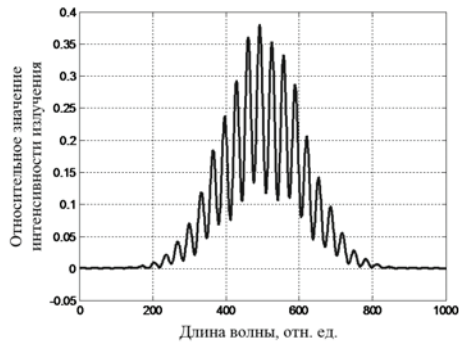


Рис. 4. Спектр суммарного сигнала на выходе интерферометра при отражении от двух поверхностей тонкой пленки, полученный в результате численного моделирования

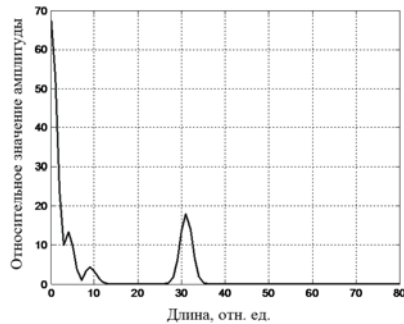


Рис. 5. Результат применения преобразования Фурье к спектру суммарного сигнала на выходе интерферометра

Задача дальнейшей обработки состоит в выделении информативной составляющей вторичного спектра для получения информации о толщине пленки.

На первом этапе решения этой задачи построен интерполяционный многочлен 2-й степени, который дал аппроксимирующую функцию для изменяющегося среднего значения при усреднении по одному периоду следования максимумов и минимумов. Путем деления исходного спектра на найденный многочлен среднее значение приводится к постоянной величине. К получившейся функции применяется преобразование Фурье.

В результате получается вторичный спектр, который имеет лишь два максимума, положение, которых на оси абсцисс соответствует расстояниям до отражающих поверхностей (рис. 6).

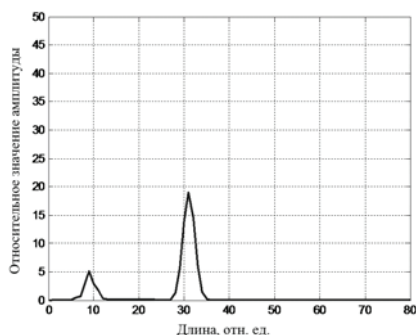


Рис. 6. Результат применения преобразования Фурье к спектру суммарного сигнала на выходе интерферометра и проведенной математической обработки

Таким образом, на вторичном спектре были идентифицированы компоненты, соответствующие поверхностям пленки. Измерение координат данных компонент на оси абсцисс относительно друг друга позволяет однозначно определить расстояние между отражающими поверхностями (толщину пленки).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Теоретические и экспериментальные исследования, представленные в работе, показали, что результаты измерений толщин тонких пленок методом спектральной интерферометрии с применением светодиодных источников оптического излучения не уступают результатам измерений, полученных с помощью промышленно-выпускаемых низко-когерентных оптических томографов, работа которых основана на том же методе. При этом для проведения экспериментов в качестве источника излучения в работе использовался современный сверхяркий светодиод, который обладает более широким спектром и гораздо меньшей стоимостью, чем суперлюминесцентные диоды, традиционно применяемые в приложениях спектральной интерферометрии.

С помощью математической обработки показана возможность устранения в экспериментально полученных результатах компонент вторичного спектра не связанных с отображением толщины пленки.

Таким образом, показана возможность применения метода спектральной интерферометрии с использованием светодиодных источников излучения для измерения толщин тонких пленок, что позволяет использовать данный метод в системах метрологического обеспечения нанотехнологий.

Литература

- [1] *Bouma B. E.* Handbook of Optical Coherence Tomography / B. E. Bouma, G. J. Tearney. – N. Y.: Marcel Dekker Inc, 2001. – 768 p.
- [2] *Poirier J.L.* Quasi-monochromatic scattering and some possible radar applications // Radio Science. – 1968. - Sept. - V. 3. – No 9. - P. 881 – 886 (перевод: Пуарье Ж. Возможность использования шумового квази-монохроматического сигнала в радиолокации // Зарубежная радиоэлектроника. – 1969. – № 7. – С. 12 – 21).
- [3] *Лукин К. А.* О трансформации спектра стохастических колебаний автогенератора под действием отражений / К. А. Лукин, В. А. Ракитянский, Б. П. Ефимов // Журн. техн. физики. – 1988. – Т. 58, № 12. – С. 2398–2400.
- [4] *Лукин К.А.* Шумовая радарная технология / К.А. Лукин // Радиофизика и электроника: сб. науч. тр. / НАН Украины. Институт радиофизики и электроники им. А. Я. Усикова НАН Украины. – Харьков, 1999.– Т. 4, № 3. – С. 105 – 111.
- [5] *Кулик В. В.* Модификация метода двойной спектральной обработки шумовых сигналов / В. В. Кулик, К. А. Лукин, В. А. Ракитянский // Укр. метрологический журнал. – 1997. – Вып. 4. – С. 28 – 32.
- [6] *Могила А. А.* Статистическая погрешность измерения расстояния методом спектральной интерферометрии / А. А. Могила, К. А. Лукин, В. В. Кулик // Радиофизика и электроника. – 2000. – Том 5, № 1. – С. 163 – 170.
- [7] *Lukin K. A.* Millimeter Wave Noise Radar Applications, Theory and Experiment / K. A. Lukin // The Fourth International

Kharkov Symposium "Physics and Engineering of Millimeter and Submillimeter Waves" (MSMW2001): int. symp., June 4-9, 2001: symp. proc. – Kharkov, Ukraine, 2001. – V 1. – P. 68 – 73.

- [8] *Lukin K. A.* Spectral Interferometry method and autodyne (self-mixing) effect for Noise Radar Application / K. A. Lukin, V. V. Kulyk, A. A. Mogyla // Int. Workshop on the Noise Radar Technology: int. workshop, Sept., 18-20, 2002: workshop proc. – Yalta, Crimea, Ukraine, 2002. – P. 179 – 186.
- [9] *Лукин К. А.* Шумовая радиолокация миллиметрового диапазона / К. А. Лукин // Радиофизика и электроника: спец. вып. – 2008. – Т. 13. – С. 344 – 358.
- [10] Лазерный измеритель расстояний на основе метода спектральной интерферометрии / К. А. Лукин, Ю. П. Мачехин, А. А. Могила, Д. Н. Татьяна, В. М. Бабич, А. С. Литвиненко // Прикладная радиоэлектроника. – 2010. – Т 9, № 2. – С. 240 – 245.
- [11] Применение метода спектральной интерферометрии для измерения микро- и нанорасстояний. / К. А. Лукин, Ю. П. Мачехин, М. Б. Данаилов, Д. Н. Татьяна // Радиофизика та електроніка. – 2011. – Т. 2 (16), № 1. – С. 39 – 45.
- [12] *Hlubina P.* Dispersive white-light spectral interferometry to measure distances and displacements / P. Hlubina // Optics Communications. – 2002. – 212, Iss. 1-3. – P. 65-70.
- [13] *Manojlović L. M.* A simple white-light fiber-optic interferometric sensing system for absolute position measurement / L. M. Manojlović // Optics and Lasers in Engineering. – 2010. – Т. 48, N 4. – P. 486-490.

Поступила в редколлегию 02.12.2016



Лукин Константин Александрович, доктор физико-математических наук, профессор, заведующий отделом нелинейной динамики электронных систем Института радиофизики и электроники им. А. Я. Усикова НАН Украины. IEEE Fellow, Руководитель исследовательской группы "Шумовая радарная технология" научно-технологической организации НАТО. Научные интересы: динамический хаос, генерация и обработка случайных сигналов, шумовая радиолокация, спектральная интерферометрия, радарная томография, наземные шумовые РСА для дистанционного зондирования.



Татьянко Дмитрий Николаевич, канд. физ.-мат. наук, научный сотрудник отдела нелинейной динамики электронных систем Института радиофизики и электроники им. А. Я. Усикова НАН Украины. Научные интересы: спектральная интерферометрия и ее применение в измерительных системах, высокоточные измерения энергетических и спектральных характеристик когерентного и шумового оптического излучения, опто-электронная техника.



Земляный Олег Васильевич, канд. физ.-мат. наук, старший научный сотрудник отдела нелинейной динамики электронных систем Института радиофизики и электроники им. А. Я. Усикова НАН Украины. Научные интересы: динамический хаос в радиофизических системах, генераторы хаотических сигналов, шумовая радиолокация, системы связи с широкополосными сигналами.



Пих Алена Богдановна, инженер отдела нелинейной динамики электронных систем Института радиофизики и электроники им. А. Я. Усикова НАН Украины. Научные интересы: измерение нано- и микрорасстояний методами оптической спектральной интерферометрии, полупроводниковые источники оптического излучения, компоненты волоконно-оптических систем.

УДК 681.785.57

Вимірювання товщини тонких плівок методом спектральної інтерферометрії / К. О. Лукін, Д. М. Татьяна, О. В. Земляний, А. Б. Піх // Прикладна радіоелектроніка: наук.-техн. журнал. – 2016. Том 15, № 4. – С. 350 – 354.

В роботі наведено результати вимірювань товщини тонких плівок з використанням широкопasmового випромінювання світлодіодів (LED) і методу спектральної інтерферометрії. Показано, що точність вимірювань не поступається точності комерційно доступних оптичних низькокогерентних томографів, робота яких заснована на тому ж методі. Застосований LED має більш широкий спектр і набагато меншу вартість порівняно з суперлюмінесцентними діодами, які зазвичай використовуються в застосуваннях спектральної інтерферометрії. Подано результат моделювання вторинного спектра сигналу, отриманого методом спектральної інтерферометрії і шляхи усунення компонент спектра, не пов'язаних з відображенням товщини плівки. В результаті роботи була підтверджена можливість вимірювання товщин тонких плівок запропонованим методом.

Ключові слова: спектральна інтерферометрія, світлодіод, тонкі плівки, волоконно-оптичний інтерферометр Фабрі-Перо.

Лл.: 06. Бібліогр.: 13 найм.

UDC 681.785.57

Measuring the thickness of thin films by spectral interferometry method / K. A. Lukin, D. N. Tatyanko, O. V. Zemlyaniy, A. B. Pikh // Applied Radio Electronics: Sci. Journ. – 2016. – Vol. 15, № 4. – P. 350 – 354.

The results of thin films thickness measurements using wideband radiation of a light-emitting diode (LED) and spectral interferometry method are presented in the paper. It has been shown that the measurement precision is not worse than one for commercially available low-coherence optical tomography devices, which are based on the same method. The LED applied has a broader spectrum and a much lower cost compared to those of super-luminescent diodes that are usually used in optical spectral interferometry applications.

The result of simulation of the secondary spectrum of the signal obtained by spectral interferometry has been shown and a method to eliminate spectral components not related to the film thickness measurement has been developed.

A possibility of measuring micro- and nano-range thickness of optically transparent films has been validated with the suggested approach.

Keywords: spectral interferometry, light-emitting diode, thin films, fiber optic Fabry-Perot interferometer.

Fig.: 06. Ref.: 13 items.