

Метод измерения распределения толщин ИТО-покрытий с помощью акустооптического видеоспектрометра

© А.В. Перчик, В.Л. Толстогузов, К.В. Стасенко, В.Г. Цепулин

МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, 105005, Россия

Описан принцип работы акустооптического спектрометра изображений и методика определения с его помощью распределения толщины тонких пленочных покрытий.

Ключевые слова: акустооптика, акустооптический фильтр, видеоспектрометр, ИТО-покрытие.

Введение. Токопроводящие пленочные покрытия широко используются при производстве прозрачных электродов жидкокристаллических экранов, органических светодиодов (OLED) и сенсорных экранов (Touchscreen). Для нанесения таких покрытий необходим прозрачный в видимой области материал, электрическая проводимость которого сравнима с проводимостью металлов. Подобными свойствами обладает оксид индия-олова (англ. *indium tin oxide* или ИТО), представляющий собой твердый раствор, содержащий 90 % оксидов индия (III) и 10 % олова (IV). Контроль качества поверхности таких покрытий (наличие или отсутствие царапин, сколов, неравномерности нанесения, разрывов дорожек) является важной задачей при их производстве, поскольку наличие дефектов может оказать негативное влияние на характеристики индикаторов.

В данной работе на основе акустооптического фильтра изображений создана экспериментальная установка для определения пространственного распределения толщин тонких пленочных ИТО-покрытий бесконтактным спектральным оптическим методом.

Акустооптический фильтр изображений. Акустооптические видеомонохроматоры предназначены для выделения из светового потока с широким спектром узкого спектрального диапазона и перестройки центральной длины волны этого диапазона в соответствии с управляющим сигналом [1]. Для фильтрации используется селективность анизотропного брэгговского рассеяния света на акустической волне. Принцип работы акустооптического фильтра заключается в том, что длины волн света и ультразвука связаны с углом падения светового пучка на акустический волновой фронт условием Брэгга.

Если на акустооптическую ячейку падает световой поток со сплошным спектром, то в дифракции принимает участие и рассеивается ультразвуком лишь свет, длина волны которого удовлетворяет условию Брэгга на заданной акустической частоте. При неизменном угле падения света и вариациях частоты ультразвука происходит перестройка устройства, так как условие Брэгга становится справедливым уже для света с другой длиной волны.

Основные характеристики фильтров — полоса пропускания $\Delta\lambda$ и разрешение $R = \lambda/\Delta\lambda$ — определяются числом периодов фазовой структуры на длине взаимодействия света и ультразвука. В акустооптических фильтрах используется анизотропная дифракция в двулучепреломляющих кристаллах (рис. 1). На акустооптическую ячейку 3 падает плоскополяризованный свет, степень поляризации которого контролируется поляризатором 1. В ячейке в результате анизотропной брэгговской дифракции в узком спектральном диапазоне возникает оптическое излучение другой поляризации. Наличие его определяется анализатором 4. Монохроматический звук создается электроакустическим преобразователем 2. Ширина полосы пропускания фильтра $\Delta\lambda_0$ (λ_0 — длина волны света в вакууме) определяется спектральной шириной излучения, возникающего в результате брэгговской дифракции:

$$\Delta\lambda_0 = \frac{\lambda_0^2}{2|n_1 - n_0|L},$$

где n_1, n_0 — показатели преломления дифрагированного и падающего света; L — длина взаимодействия. В реальных устройствах ширина полосы пропускания зависит от расходимости как светового, так и акустического пучков и спектрального состава акустического сигнала.

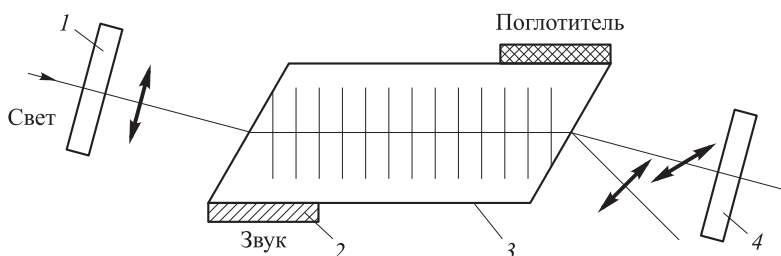


Рис. 1. Акустооптический фильтр

Значение $\Delta\lambda_0$ существенно зависит от выбора участка электромагнитного спектра; в видимом диапазоне оно не превышает нескольких ангстрем [2].

Двойная фильтрация излучения обеспечивает повышенный контраст видеомонохроматора и более узкую полосу пропускания. При использовании такой схемы не происходит смещения элементов передаваемого изображения при перестройке по спектру [3].

В данной работе применен двойной акустооптический монохроматор АVM-1. Технические характеристики монохроматора АVM-1:

Число акустооптических фильтров	2
Спектральный диапазон, мкм	0,44...0,76
Число разрешимых элементов изображения, пар линий	320×250
Спектральное разрешение, нм	2,0×633
Входной зрачок, мм	8

Методика определения толщины пленки. При прохождении излучения через тонкую пленку в ней происходит интерференция, вызванная многократным переотражением от ее поверхностей. Интенсивность отраженного излучения определяется разностью фаз волн, отраженных от нижней и верхней границ раздела пленки, и затуханием волны. Разность фаз, в свою очередь, для заданной длины волны зависит от толщины пленки и ее показателя преломления. Таким образом, спектр коэффициента отражения содержит в себе информацию об искомых параметрах пленки, значения которых можно вычислить путем обработки нескольких измерений для разных длин волн.

Будем считать, что подложка имеет достаточную толщину для того, чтобы отражение излучения от ее нижней грани можно было не учитывать. Запишем амплитудные коэффициенты отражения для границы раздела воздух—пленка для составляющих, поляризованных соответственно перпендикулярно и параллельно плоскости падения пучка [4]:

$$r_{12\perp} = \frac{n_1 \cos \theta_1 - \hat{n}_2 \cos \theta_2}{n_1 \cos \theta_1 + \hat{n}_2 \cos \theta_2} = \frac{n_1 \cos \theta_1 - (u_2 + iv_2)}{n_1 \cos \theta_1 + (u_2 + iv_2)},$$

$$r_{12\parallel} = \frac{\frac{1}{n_1} \cos \theta_1 - \frac{1}{\hat{n}_2} \cos \theta_2}{\frac{1}{n_1} \cos \theta_1 + \frac{1}{\hat{n}_2} \cos \theta_2} = \frac{[n_2^2(1 - k_2^2) + 2i n_2^2 k_2] \cos \theta_1 - n_1(u_2 + iv_2)}{[n_2^2(1 - k_2^2) + 2i n_2^2 k_2] \cos \theta_1 + n_1(u_2 + iv_2)},$$

где $n_1 = 1$ — показатель преломления воздуха; n_2, n_3 — показатели преломления пленки и подложки; k_2 — коэффициент экстинкции пленки; i — комплексная единица; θ_1 — угол между нормалью к поверхности пленки и вектором распространения падающего излучения; θ_2 — угол между нормалью и волновым вектором преломленной на границе раздела волны; $u_2 = \text{Re}(\hat{n}_2 \cos \theta_2)$; $v_2 = \text{Im}(\hat{n}_2 \cos \theta_2)$.

Комплексные значения коэффициентов отражения можно представить в виде

$$r_{12\perp} = \rho_{12\perp} \exp(i\varphi_{12\perp});$$

$$r_{12\parallel} = \rho_{12\parallel} \exp(i\varphi_{12\parallel}).$$

Аналогичные выражения можно записать и для второй границы раздела сред — пленка—подложка. Углы θ_2 и θ_3 могут быть найдены из закона Снеллиуса. Следует учитывать, что $\cos\theta_2$ — комплексная величина для сред с $k \neq 0$. Коэффициент отражения по интенсивности (отражательная способность) от тонкой металлической пленки на неметаллической подложке для составляющей, поляризованной перпендикулярно плоскости падения пучка, определяется по известной формуле [4]:

$$R_{\perp} = \frac{\rho_{12\perp}^2 \exp(2v_2\eta) + \rho_{23\perp}^2 \exp(-2v_2\eta) + 2\rho_{12\perp}\rho_{23\perp} \cos(\varphi_{23\perp} - \varphi_{12\perp} + 2u_2\eta)}{\exp(2v_2\eta) + \rho_{12\perp}^2\rho_{23\perp}^2 \exp(-2v_2\eta) + 2\rho_{12\perp}\rho_{23\perp} \cos(\varphi_{23\perp} + \varphi_{12\perp} + 2u_2\eta)},$$

где $\eta = \frac{2\pi d}{\lambda}$.

Индекс «12» соответствует первой границе раздела сред (воздух—пленка), индекс «23» — второй (пленка—подложка).

Выражение для отражательной способности составляющей излучения, поляризованной параллельно плоскости падения R_{\parallel} , можно получить, заменив $\rho_{12\perp}$, $\rho_{23\perp}$, $\varphi_{12\perp}$ и $\varphi_{23\perp}$ на $\rho_{12\parallel}$, $\rho_{23\parallel}$, $\varphi_{12\parallel}$ и $\varphi_{23\parallel}$. Отражательная способность излучения, поляризованного под углом α к плоскости падения,

$$R = R_{\parallel} \cos^2 \alpha + R_{\perp} \sin^2 \alpha.$$

Из приведенных выше выражений следует, что отражательная способность определяется следующими параметрами: длиной волны падающего излучения, показателем преломления, коэффициентом экстинкции, толщиной пленки, поляризацией и углом падения излучения. Считая известными угол падения, поляризацию и длину волны излучения, можно определить остальные параметры, проведя измерения отражательной способности для разных длин волн.

Для достаточно сильно различающихся длин волн следует учитывать дисперсию материала. Значения n_2 и k_2 можно аппроксимировать полиномами

$$n_2(\lambda) = \frac{A}{\lambda^3} + \frac{B}{\lambda^2} + \frac{C}{\lambda} + D;$$

$$k_2(\lambda) = \frac{a}{\lambda^3} + \frac{b}{\lambda^2} + \frac{c}{\lambda} + d,$$

где A, B, C, D, a, b, c, d — константы, зависящие от материала; λ — длина волны.

Введем функцию $R(\lambda, d, \theta_1, A, B, C, D, a, b, c, d)$, тогда теоретическое значение отражательной способности можно записать в виде

$$R_t(\mathbf{x}, \mathbf{p}) = R(\lambda, d, \theta_1, A, B, C, D, a, b, c, d),$$

где \mathbf{x} — вектор аргументов, состоящий из известных во время измерения величин, \mathbf{p} — вектор параметров, состоящий из неизвестных и постоянных от измерения к измерению величин, входящих в функцию.

В частном случае $k_2(\lambda) = 0$, $a = 0$, $b = 0$, $c = 0$, $d = 0$.

Определим функцию невязки

$$S(\mathbf{p}) = \sum_{i=0}^N [R_t(\mathbf{x}_i, \mathbf{p}) - R_e(\mathbf{x}_i)]^2,$$

где i — номер измерения; N — общее число измерений; $R_e(\mathbf{x}_i)$ — экспериментальное значение, измеренное при известных значениях аргументов \mathbf{x}_i .

Нахождение вектора неизвестных параметров сводится к определению точки минимума функции $S(\mathbf{p})$. Если функция $S(\mathbf{p})$ принимает минимальное значение, то вектор \mathbf{p} содержит искомые параметры пленки.

Экспериментальная проверка. На рис. 2 представлена экспериментальная установка, состоящая из источника излучения (сверхяркого светодиода), исследуемого образца, микрообъектива, перестраиваемого акустооптического фильтра изображений и ПЗС-приемника. Для повышения контраста изображения ИТО-пленки образец освещается линейно поляризованным излучением под углом Брюстера, рассчитанным для показателя преломления подложки. При этом излучение отражается только от пленки.

Спектральные изображения исследуемой ИТО-пленки толщиной 300 нм на разных длинах волн представлены на рис. 3. Проведя анализ спектра пропускания различных областей пленки, можно построить пространственное распределение толщины нанесенного ИТО-покрытия.

Экспериментальный спектр отражения (кривая 1) и спектр, вычисленный теоретически с использованием найденных параметров в разработанной математической модели (кривая 2) приведены на рис. 4,

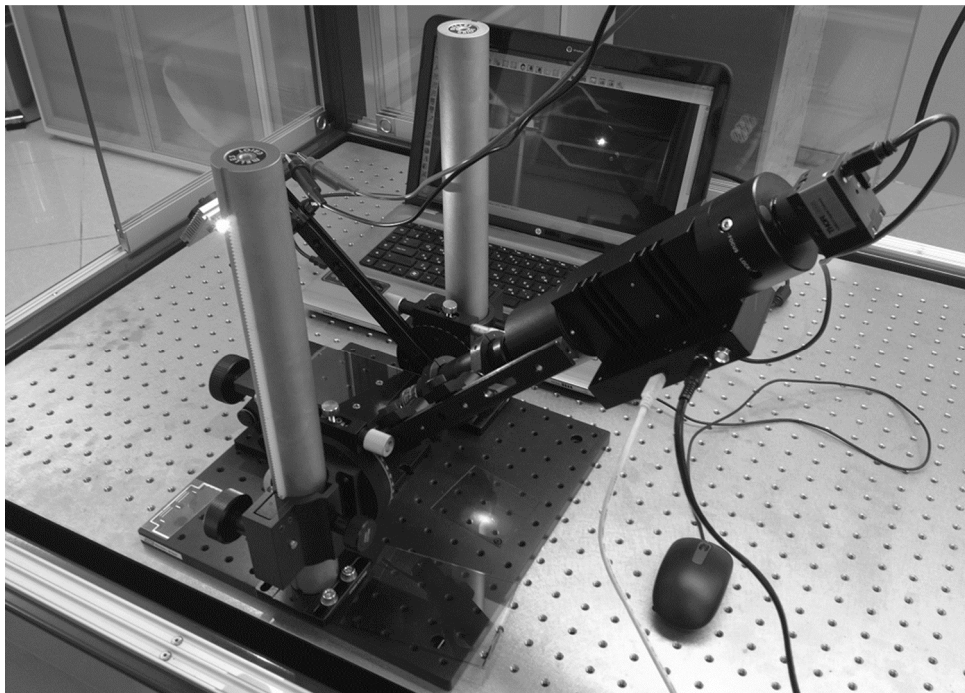


Рис. 2. Экспериментальная установка

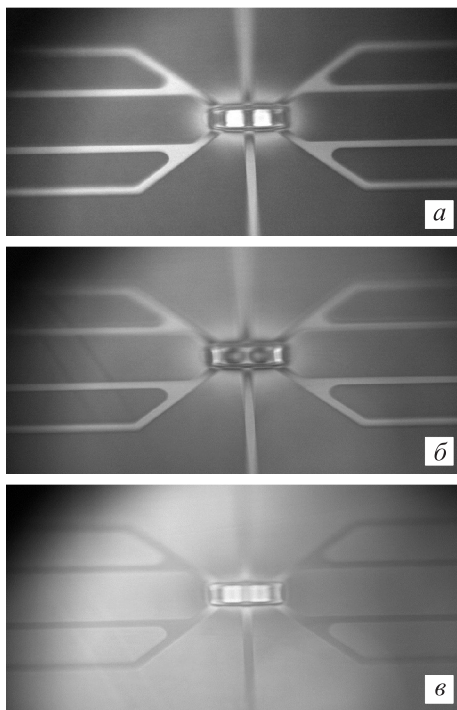


Рис. 3. Спектральные изображения пленочного покрытия:
а — на длине волны 430 нм; б — 500 нм; в — 640 нм

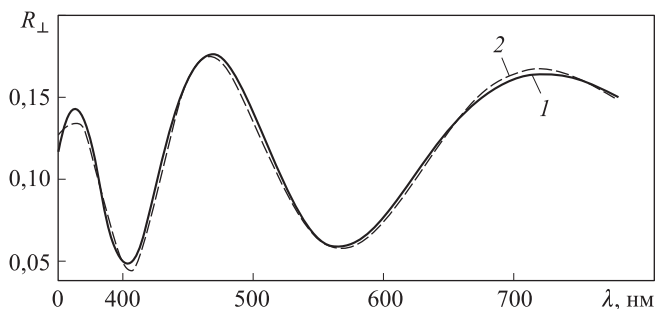


Рис. 4. Спектры отражения:

1 — экспериментальный; 2 — промоделированный

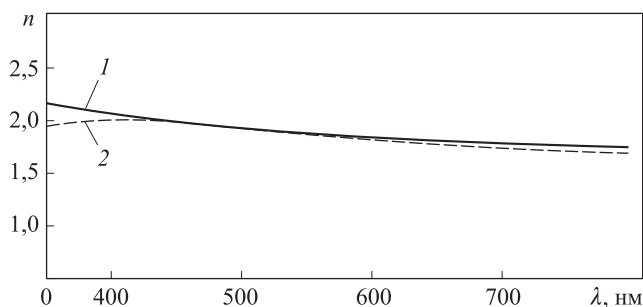


Рис. 5. Спектральные зависимости показателя преломления от длины волны падающего излучения:

1 — справочная; 2 — экспериментальная

справочная (кривая 1) и экспериментальная (кривая 2) спектральные зависимости показателя преломления — на рис. 5.

Видно, что теоретические и экспериментальные данные совпадают — это позволяет сделать вывод об адекватности разработанного метода. Незначительное расхождение зависимостей коэффициента отражения в области коротких волн может быть обусловлено сильным рассеянием на зернистой структуре материала исследуемого образца. Полученное значение толщины пленочного покрытия составляет 298,8 нм, измеренное другими методами — 300 нм.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Пустовойт В.И., Пожар В.Э. Акустооптические спектральные устройства: состояние и перспективы. *Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Приборостроение*, 2011, № S2, с. 6–15.
- [2] Балакший В.И., Парыгин В.И., Чирков Л.И. *Физические основы акустооптики*. Москва, Радио и связь, 1985, 280 с.
- [3] Мазур М.М., Пожар В.Э., Пустовойт В.И., Шорин В.Н.. Двойные акустооптические монохроматоры. *Успехи современной радиоэлектроники*, 2006, № 10, с. 19–30.
- [4] Борн М., Вольф Э. *Основы оптики*. Москва, Наука, 1973, 720 с.

Статья поступила в редакцию 03.07.2013

Ссылку на эту статью просим оформлять следующим образом:

Перчик А.В., Толстогузов В.Л., Стасенко К.В., Цепулин В.Г. Метод измерения распределения толщин ИТО-покрытий с помощью акустооптического видеоспектрометра. *Инженерный журнал: наука и инновации*, 2013, вып. 9.

URL: <http://engjournal.ru/catalog/pribor/optica/915.html>

Перчик Алексей Вячеславович окончил МГТУ им. Н.Э. Баумана в 2004 г. Канд. техн. наук, старший научный сотрудник НОЦ «Фотоника и ИК-техника», заведующий лабораторией акустооптических спектральных устройств и систем. e-mail: perchikav@gmail.com.ru

Толстогузов Виктор Леонидович окончил МГТУ им. Н.Э. Баумана в 2004 г. Научный сотрудник НОЦ «Фотоника и ИК-техника», заведующий лабораторией микрооптоэлектромеханических систем. e-mail: kedrovka@mail.ru

Стасенко Кристина Владимировна — студентка 6-го курса кафедры «Лазерные и оптико-электронные системы» МГТУ им. Н.Э. Баумана. e-mail: stasenko.kristina@mail.ru

Цепулин Владимир Германович — студент 6-го курса кафедры «Лазерные и оптико-электронные системы» МГТУ им. Н.Э. Баумана. e-mail: tsepulin@gmail.com