

Дементьева Александра Леонидовна

Студент

*Удмуртский государственный университет, институт математики,
информационных технологий и физики*

ВЫБОР ОПТИМАЛЬНЫХ УСЛОВИЙ ДЛЯ ЭЛЛИПСОМЕТРИЧЕСКИХ ИЗМЕРЕНИЙ УЛЬТРАТОНКИХ ПРОЗРАЧНЫХ ПЛЁНОК ОКСИДА ОЛОВА

Аннотация. Представлены результаты комплексного исследования оптимальных условий эллипсометрических измерений тонких прозрачных плёнок оксида олова (SnO_2) на стеклянных подложках. Проведён анализ чувствительности метода в зависимости от угла падения излучения и параметров образца. Разработаны рекомендации по повышению точности измерений.

Ключевые слова: эллипсометрия, тонкие плёнки, оксид олова, оптические измерения, эллипсометрические параметры.

Введение

В современной науке и технике наблюдается повышенный интерес к исследованию тонких полупроводниковых плёнок, например, таких, как оксид олова SnO_2 . Это обусловлено тем, что данный оксид широко применяется в создании фото- и оптоэлектронных устройств, детекторов, а также солнечных панелей. Очень востребовано применение наноплёнок оксида олова для упрочнения стеклянной тары, так называемое горячее покрытие.

Для определения толщины горячего покрытия наиболее точным методом является метод эллипсометрии. Данный метод является одним из наиболее точных способов определения оптических характеристик тонких плёнок. В связи с этим особую актуальность приобретает разработка оптимальных условий проведения эллипсометрических измерений для получения максимально точных результатов.

Именно поэтому целью данного исследования является определение оптимальных условий проведения эллипсометрических измерений тонких прозрачных плёнок оксида олова на прозрачных подложках для повышения точности определения их оптических характеристик.

Задачами данного исследования являются:

- 1) Решение обратной задачи эллипсометрии для полубесконечной среды;
- 2) Выбор оптимальных условий измерения для получения наиболее точных измерений подложек (т.е. полубесконечной среды);
- 3) Выбор оптимальных условий измерения наноразмерных прозрачных плёнок на прозрачных поверхностях путём решения прямой задачи эллипсометрии и выбора углов падения поляризованного излучения, наиболее чувствительных к изменению параметров системы «Плёнка-подложка»;
- 4) Определение процедуры нахождения параметров тонкой прозрачной плёнки (показателя преломления и толщины) на прозрачной подложке;
- 5) Получить ряда тонких образцов оксида олова на стеклянных подложках и определение их показателя преломления и толщины.

Объектом исследования являются тонкие плёнки оксида олова.

В работе использованы такие **методы исследования**, как:

- 1) Теоретический анализ существующей на данную тему литературы;
- 2) Математическое моделирование;
- 3) Экспериментальное исследование;
- 4) Статистическая обработка результатов.

Результаты данного исследования позволят:

- 1) Повысить точность определения параметров тонких плёнок;
- 2) Улучшить качество измерительных процедур;
- 3) Расширить возможности метода эллипсометрии.

Структура работы:

Исследование состоит из теоретической и экспериментальной частей, анализа полученных результатов заключения по данной работе.

Теоретические основы метода эллипсометрии

Эллипсометрия - это высокоточный оптический метод исследования поверхностей и тонких плёнок, основанный на анализе измерения поляризации света при его отражении от исследуемого образца.

Данный метод позволяет определить:

- 1) Оптические константы материалов;
- 2) Толщину тонких плёнок.

Основные понятия и параметры:

Эллипс поляризации - это геометрическое место концов вектора напряжённости электрического поля световой волны (рис. 1). Он характеризуется двумя основными параметрами:

Угол азимута Ψ - характеризует отношение амплитуд компонент поляризации;

Разность фаз Δ - определяет фазовый сдвиг между компонентами.

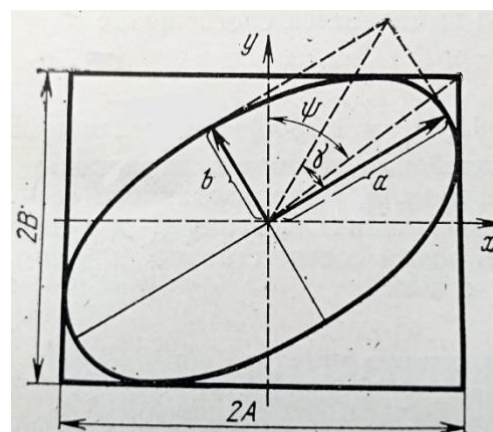


Рис. 1. Эллипс поляризации.

Прямая задача эллипсометрии – это определение эллипсометрических характеристик отражённого электромагнитного излучения от поверхности, для которой известны высота, форма, плотность и закон распределения неровностей; наличие плёнок и их свойства в измеряемом диапазоне. То есть это определение значений эллипсометрических углов, зная оптические параметры окружающей среды, плёнки, подложки.

Обратная задача эллипсометрии - это нахождение параметров исследуемой системы по измеренным поляризационным характеристикам отражённого сигнала. То есть определение толщины и показателя преломления плёнки, зная значения эллипсометрических углов.

Также с помощью метода эллипсометрии можно изучать различные оптические системы. И от этого напрямую зависит вид прямых уравнений. Так, в ходе данной работы изучаются две оптические системы: полубесконечная среда и система «Прозрачная плёнка – Прозрачная подложка».

Прямая задача эллипсометрии для полубесконечной среды

Под полубесконечной средой подразумевают чистую подложку без плёнки, находящуюся в окружающей среде (рис. 2).

Для прямой задачи аналитически находятся Ψ и Δ с использованием выражений для комплексных коэффициентов отражения (коэффициентов Френеля для s-составляющей r_s и для p-составляющей r_p падающей волны), зависящих от модели отражающей системы. Для полубесконечной среды они соответствуют следующим выражениям (следует отметить, что рассматривается поверхность при нахождении в воздухе с показателем преломления равным 1):

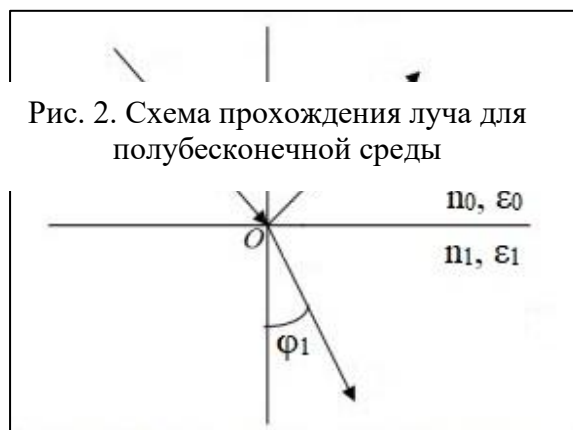


Рис. 2. Схема прохождения луча для полубесконечной среды

$$\left. \begin{aligned} r_p &= \frac{N_2^2 \cos \varphi_0 - \sqrt{N_2^2 - \sin^2 \varphi_0}}{N_2^2 \cos \varphi_0 + \sqrt{N_2^2 - \sin^2 \varphi_0}} \\ r_s &= \frac{\cos \varphi_0 - \sqrt{N_2^2 - \sin^2 \varphi_0}}{\cos \varphi_0 + \sqrt{N_2^2 - \sin^2 \varphi_0}} \end{aligned} \right\} , \text{ где} \quad (1)$$

φ_0 – угол падения света, отсчитанный от нормали к поверхности образца;

$N_2 = n_2 + ik_2$ – комплексный показатель преломления подложки, где n_2 – показатель преломления среды, k_2 – показатель поглощения среды.

Для данной оптической системы основное уравнение эллипсометрии будет выглядеть следующим образом:

$$\text{tg} \Psi \cdot e^{i\Delta} = \text{tg} \Psi \cos \Delta + i \text{tg} \Psi \sin \Delta = f(\varphi_0, N_2) = \frac{r_p}{r_s} = \rho \quad (2)$$

Отсюда

$$\Psi = \arctg \sqrt{\left[\operatorname{Re} \left(\frac{\bar{r}_p}{\bar{r}_s} \right) \right]^2 + \left[\operatorname{Im} \left(\frac{\bar{r}_p}{\bar{r}_s} \right) \right]^2} \quad (3)$$

$$\Delta = \arctg \left(\frac{\operatorname{Im} \left(\frac{\bar{r}_p}{\bar{r}_s} \right)}{\operatorname{Re} \left(\frac{\bar{r}_p}{\bar{r}_s} \right)} \right) \quad (4)$$

Областью значений функции \arctg является интервал от $-\frac{\pi}{2}$ до $\frac{\pi}{2}$, а Δ измеряется на приборе от 0 до 2π . Поэтому используют следующие правила:

1. Если $\operatorname{Im} \left(\frac{\bar{r}_p}{\bar{r}_s} \right) < 0$, а $\operatorname{Re} \left(\frac{\bar{r}_p}{\bar{r}_s} \right) > 0$, то $\Delta = \Delta + 2\pi$;
2. Если $\operatorname{Re} \left(\frac{\bar{r}_p}{\bar{r}_s} \right) < 0$, то $\Delta = \Delta + \pi$;
3. Если $\operatorname{Im} \left(\frac{\bar{r}_p}{\bar{r}_s} \right) > 0$, а $\operatorname{Re} \left(\frac{\bar{r}_p}{\bar{r}_s} \right) > 0$, то $\Delta = \Delta$.

Для эллипсометрического угла Ψ дополнительных условий нет, он находится однозначно, по формуле (3).

Обратная задача эллипсометрии для полубесконечной среды

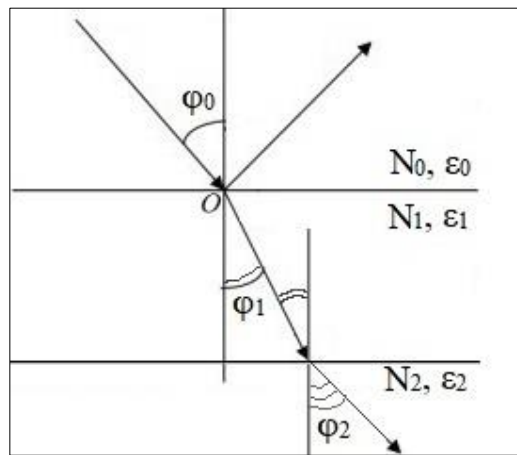
Если измеряемая система является полубесконечной средой (рис.2), т.е. чистой поверхностью, то обратная задача, т.е. нахождение параметров исследуемой системы по измеренным поляризационным характеристикам отражённого сигнала, решается аналитически. В этом случае комплексные коэффициенты отражения также равны коэффициентам Френеля (1).

Тогда основное уравнение эллипсометрии для полубесконечной среды, которое связывает измеренные эллипсометрические параметры с комплексным показателем преломления материала, будет выглядеть следующим образом:

$$\operatorname{tg} \Psi \cdot e^{i\Delta} = \frac{\sin^2 \varphi_0 - \cos \varphi_0 \sqrt{N_2^2 - \sin^2 \varphi_0}}{\sin^2 \varphi_0 + \cos \varphi_0 \sqrt{N_2^2 - \sin^2 \varphi_0}} = \rho \quad (5)$$

Измеряемыми величинами являются эллипсометрические углы Ψ и Δ , определяемым параметром – N_2 – комплексный показатель преломления подложки.

Решение выражения (5) относительно N_2 (выражение N_2 через параметры Ψ и Δ) записывается в виде:



$$N_2 = \sin \varphi_0 \sqrt{1 + \operatorname{tg}^2 \varphi_0 \left(\frac{1 - r_0}{1 + r_0} \right)^2} \quad (6)$$

Отсюда

$$n_2 = \operatorname{Re}(N_2) \quad \text{и} \quad k_2 = \operatorname{Im}(N_2), \quad \text{где} \quad (7)$$

n_2 – показатель преломления подложки,

k_2 – показатель поглощения подложки.

Последние уравнения (7) позволяют определить оптические постоянные для полубесконечной среды.

Прямая задача для системы «Прозрачная плёнка – Прозрачная подложка».

Самый простой случай, когда прозрачная плёнка нанесена на известную подложку, то есть мы знаем показатели преломления и поглощения данной подложки (рис. 3).

Рис. 3. Схема прохождения луча для системы «Прозрачная плёнка – Прозрачная подложка».

является отношением коэффициентов Френеля для р- и з- составляющих падающей волны, однако выглядит оно немного иначе:

Рис. 3. Схема прохождения луча для системы «Прозрачная плёнка - Прозрачная подложка».

$$\operatorname{tg}\Psi \cdot e^{i\Delta} = \frac{R_p}{R_s} = \frac{r_{01p} + r_{12p} e^{-2i\delta}}{1 + r_{01p} r_{12p} e^{-2i\delta}} \cdot \frac{1 + r_{01s} r_{12s} e^{-2i\delta}}{r_{01s} + r_{12s} e^{-2i\delta}}, \text{ где} \quad (8)$$

$$R_p = \frac{r_{01p} + r_{12p} e^{-2i\delta}}{1 + r_{01p} r_{12p} e^{-2i\delta}} - \text{коэффициент отражения } p - \text{ составляющей подающей}$$

волны;

$$R_s = \frac{r_{01s} + r_{12s} e^{-2i\delta}}{1 + r_{01s} r_{12s} e^{-2i\delta}} - \text{коэффициент отражения } s - \text{ составляющей подающей}$$

волны;

$$r_{01p} = \frac{\sqrt{\varepsilon_1} \cos \varphi_0 - \sqrt{\varepsilon_0} \cos \varphi_1}{\sqrt{\varepsilon_1} \cos \varphi_0 + \sqrt{\varepsilon_0} \cos \varphi_1}, \quad r_{12p} = \frac{\sqrt{\varepsilon_2} \cos \varphi_1 - \sqrt{\varepsilon_1} \cos \varphi_2}{\sqrt{\varepsilon_2} \cos \varphi_1 + \sqrt{\varepsilon_1} \cos \varphi_2} -$$

коэффициенты отражения Френеля для р-компоненты электрического поля, относящиеся соответственно к границам между средами с диэлектрическими проницаемостями ε_0 и ε_1 , ε_1 и ε_2 (причём, $\sqrt{\varepsilon_2} = n_2 - ik_2$ и $\sqrt{\varepsilon_1} = n_1 - ik_1$, где n_1 и n_2 – показатели преломления, k_1 и k_2 – коэффициенты поглощения, а $\varepsilon_0 = n_0^2$);

$$r_{01s} = \frac{\sqrt{\varepsilon_0} \cos \varphi_0 - \sqrt{\varepsilon_1} \cos \varphi_1}{\sqrt{\varepsilon_0} \cos \varphi_0 + \sqrt{\varepsilon_1} \cos \varphi_1}, \quad r_{12s} = \frac{\sqrt{\varepsilon_1} \cos \varphi_1 - \sqrt{\varepsilon_2} \cos \varphi_2}{\sqrt{\varepsilon_1} \cos \varphi_1 + \sqrt{\varepsilon_2} \cos \varphi_2} -$$

коэффициенты отражения Френеля для s-компоненты, относящиеся соответственно к тем же границам, что и r_{01p} и r_{12p} ;

$$\delta = \frac{\omega}{c} d \sqrt{\varepsilon_1 - \varepsilon_0 \sin^2 \varphi_0} - \text{разность фаз;}$$

φ_0 – угол падения в среде с показателем преломления N_0 ;

φ_1 – угол падения в среде с показателем преломления N_1 ;

φ_2 – угол падения в среде с показателем преломления N_2 .

Несмотря на то, что коэффициенты отражения для рассматриваемой оптической системы отличаются от коэффициентов для полубесконечной среды, итоговые формулы для определения значений эллипсометрических углов Ψ и Δ остаются неизменными. То есть данные углы мы находим по формулам (3 и 4):

$$\Psi = \operatorname{arctg} \sqrt{\left[\operatorname{Re} \left(\frac{\bar{r}_p}{\bar{r}_s} \right) \right]^2 + \left[\operatorname{Im} \left(\frac{\bar{r}_p}{\bar{r}_s} \right) \right]^2}$$

$$\Delta = \operatorname{arctg} \left(\frac{\operatorname{Im} \left(\frac{\bar{r}_p}{\bar{r}_s} \right)}{\operatorname{Re} \left(\frac{\bar{r}_p}{\bar{r}_s} \right)} \right)$$

Для эллипсометрического угла Ψ дополнительных условий также нет, он находится однозначно, по формуле (3). А эллипсометрический угол Δ ограничивается такими же условиями, что и аналогичный угол для полубесконечной среды.

Решение обратной задачи эллипсометрии «Прозрачная плёнка – Прозрачная подложка» по методу Холмса

В ходе рассмотрения данной задачи был изучен так называемый метод Холмса. Важным условием использования данного метода является то, что плёнка должна являться оптически прозрачным покрытием, а также должны быть известны оптические параметры подложки.

Суть данного метода заключается в том, что модуль экспоненты в левой части уравнения (8) считают равным единице (9) в независимости от толщины и показателя преломления плёнки. Данное условие применяется только в случае непоглощающих покрытий.

$$|X| = |e^{-2i\delta}| = \left| \cos\left(-4\pi \frac{d}{\lambda} n_1 \cos \varphi_1\right) + i \sin\left(-4\pi \frac{d}{\lambda} n_1 \cos \varphi_1\right) \right| = 1 \quad (9)$$

Представим уравнение (8) в виде квадратного уравнения относительно неизвестной $X = e^{-2i\delta}$:

$$C_2 X^2 + C_1 X + C_0 = 0, \text{ где} \quad (10)$$

$$\left. \begin{aligned} C_0 &= \rho R_{21S} - R_{21P} \\ C_1 &= \rho(R_{10S} + R_{21S} R_{21P} R_{10P}) - (R_{10S} + R_{21P} R_{21S} R_{10S}) \\ C_2 &= \rho R_{10S} R_{21P} R_{10P} - R_{10P} R_{21S} R_{10S} \end{aligned} \right\}, \text{ где} \quad (11)$$

$\rho = \text{tg} \Psi \cdot e^{i\Delta}$ - основное уравнение эллипсометрии;

$$R_{10S} = \frac{\sqrt{\varepsilon_1} \cdot \cos \varphi_1 - \sqrt{\varepsilon_0} \cdot \cos \varphi_0}{\sqrt{\varepsilon_1} \cdot \cos \varphi_1 + \sqrt{\varepsilon_0} \cdot \cos \varphi_0}, \quad R_{21S} = \frac{\sqrt{\varepsilon_2} \cdot \cos \varphi_2 - \sqrt{\varepsilon_1} \cdot \cos \varphi_1}{\sqrt{\varepsilon_2} \cdot \cos \varphi_2 + \sqrt{\varepsilon_1} \cdot \cos \varphi_1} -$$

коэффициенты отражения Френеля для s-составляющей падающей волны;

$$R_{10P} = \frac{\sqrt{\varepsilon_0} \cdot \cos \varphi_1 - \sqrt{\varepsilon_1} \cdot \cos \varphi_0}{\sqrt{\varepsilon_0} \cdot \cos \varphi_1 + \sqrt{\varepsilon_1} \cdot \cos \varphi_0}, \quad R_{21P} = \frac{\sqrt{\varepsilon_1} \cdot \cos \varphi_2 - \sqrt{\varepsilon_2} \cdot \cos \varphi_1}{\sqrt{\varepsilon_1} \cdot \cos \varphi_2 + \sqrt{\varepsilon_2} \cdot \cos \varphi_1} -$$

коэффициенты отражения Френеля для p-составляющей падающей волны.

Решением уравнения (10) будут два корня, то есть два различных значения показателя преломления плёнки, из которых нам подходит тот, который имеет

положительную действительную и отрицательную мнимую части. Различные значения выражения $|X|$ соответствуют различным значениям показателя преломления плёнки n_1 , но значение $|X|=1$ соответствует только искомому значению показателя преломления плёнки n_{1p} .

В итоге поиск значения n_{1p} , которое соответствует измеренным эллипсометрическим углам, сводится к определению точки пересечения двух кривых: $|X|=1$ и $|X|=f(n_1)$ на заданном интервале предполагаемых значений показателя преломления плёнки. Это можно сделать графически, то есть построить график зависимости функции X от показателя преломления плёнки.

После нахождения значения показателя преломления плёнки можно определить значение толщины этой плёнки по следующей формуле:

$$d_p = i \frac{\lambda}{4\pi n_{1p} \cos \varphi_1} \ln X \quad (12)$$

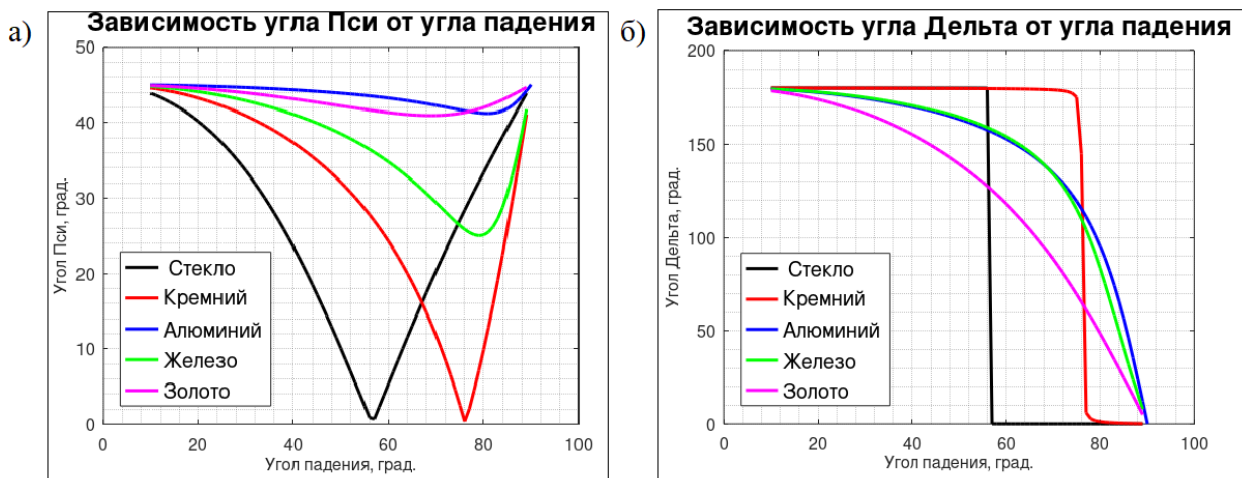
Решение обратной задачи эллипсометрии «Прозрачная плёнка на подложке» по методу Кацубы

В ходе рассмотрения данной задачи был изучен так называемый метод Кацубы. Автор предлагает свой собственный план действий по решению обратной задачи эллипсометрии для системы «Прозрачная плёнка – Прозрачная подложка». Он выглядит следующим образом:

1. Определяются оптические параметры среды (n_2 и k_2) и угловую зависимость Ψ_0 (φ_0) для голой подложки;
2. Осаждают плёнку на подложку. Определяют значения эллипсометрических углов при угле падения φ_0 ;
3. Определяют показатель преломления плёнки, используя формулу (13):

$$n_1 = n_2 \cdot \sqrt{\frac{2n_2^2(n_0^2 - k_0^2) \operatorname{tg}^2 \varphi_0 - (n_0^2 - k_0^2)^2 (\operatorname{tg}^2 \varphi_0 + 1)}{n_2^4 \operatorname{tg}^2 \varphi_0 - (n_0^2 - k_0^2)^2}} \quad (13)$$

4. Вычисляют коэффициент чувствительности S в рамках предлагаемой модели по формуле (14);



$$S = \frac{4\pi}{\lambda} n_2 \sin \varphi_0 \tan \varphi_0 \cdot \operatorname{Re} \left(\frac{N_0^2 (n_1^2 - n_2^2) (n_1^2 - N_0^2)}{n_1^2 (n_0^2 - n_2^2) (N_0^2 - n_0^2) \tan^2 \varphi_0} \right) \quad (14)$$

5. Рассчитывают толщину плёнки по обратному отношению (15).

$$\Delta - \Delta_0 = S d_1 \quad (15)$$

Результаты решения прямой задачи эллипсометрии для полубесконечной среды

Для этого была написана программа на языке «Octave», с помощью которой определялись значения эллипсометрических углов для чистой подложки (без плёнки) из разных материалов (стекло, кремний, алюминий, железо и золото) в окружающей среде – воздухе. В итоге были построены графики зависимости эллипсометрических углов от угла падения. Данные графики представлены на рисунке 4(а, б).

Полученные графики полностью совпадают с литературными представлениями. Как видно по графикам, изменения происходят примерно при угле Брюстера, который для каждого материала свой. По виду угловых

Рис. 4. Зависимость эллипсометрических углов от угла падения: а) Зависимость угла Ψ от угла падения; б) Зависимость угла Δ от угла падения

зависимостей можно качественно судить о свойствах материала: является материал проводником, диэлектриком или полупроводником.

Результаты машинного эксперимента решения обратной задачи эллипсометрии для полубесконечной среды

Также была решена обратная задача эллипсометрии. Также была написана программа на языке «Octave», в которой по значениям эллипсометрических углов, можно определять показатели преломления и поглощения подложки (для полубесконечной среды). Для проверки правильности вычислений и определения точности сначала были вычислены теоретические значения эллипсометрических углов Ψ и Δ для модельного образца (стекла с известными значениями $n=1.514$ и $k=0.00002$). Затем по формулам (7) были определены значения n и k и определена погрешность вычисления (таблица № 1).

Таблица № 1 - Значения эллипсометрических углов и оптических постоянных для полубесконечной среды в случае стеклянной подложки ($n = 1.514-0.00002i$, угол Брюстера для стекла равен $56^\circ 40'$)

Угол падения	Ψ , град.	Δ , град.	n	\pm	k	\pm
50	10.0431	179.997	1.40077	0.113232	1.2294e-05	3.2294e-05
51	8.54999	179.997	1.62005	0.106053	2.59288e-05	4.59288e-05
52	7.0388	179.996	1.41832	0.0956761	1.1362e-05	3.1362e-05
53	5.51214	179.995	1.57302	0.0590229	2.5253e-05	4.5253e-05
54	3.97269	179.992	1.45435	0.0596453	1.10725e-05	3.10725e-05
55	2.42318	179.987	1.53964	0.025639	2.5478e-05	4.5478e-05
56	0.866389	179.964	1.50045	0.0135481	1.13245e-05	3.13245e-05
57	0.694907	0.0450072	1.5216	0.0075976	1.41775e-05	3.41775e-05
58	2.25795	0.0139645	1.47466	0.0393449	2.98182e-05	98182e-05
59	3.82005	0.00830424	1.55318	0.039175	1.50974e-05	3.50974e-05
60	5.3786	0.0059213	1.40351	0.110486	3.22175e-05	5.22175e-05

По данным таблицы также были построены соответствующие графики. Они представлены на рисунке 5(а – е).

Из рисунка 5(а – е) можно заметить, что минимальная погрешность в определении показателей преломления и поглощения приходится на угол в 56° и на прилежащие углы.

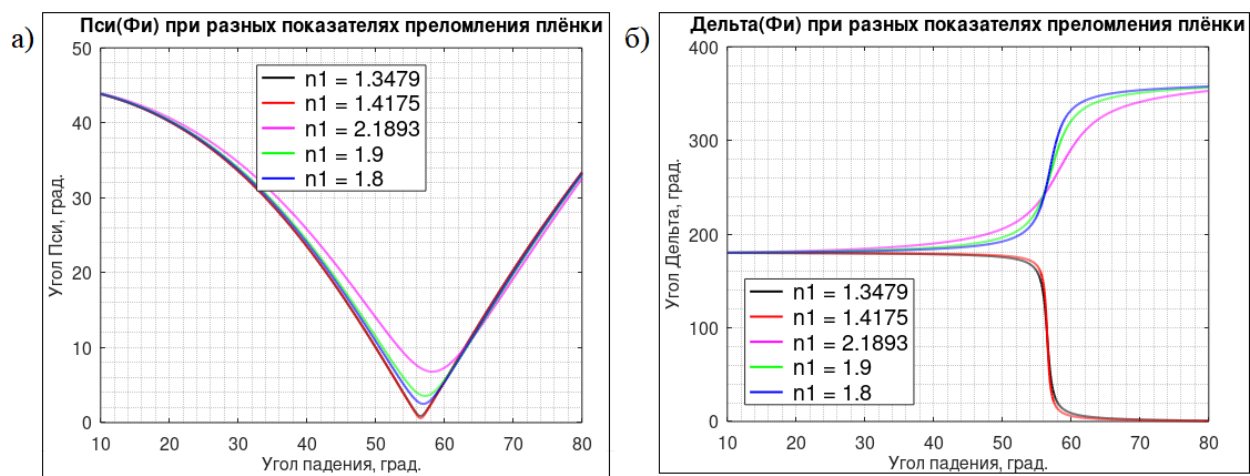
Согласно таблице № 1 минимальная погрешность определения показателя преломления соответствует ± 0.0076 при угле падения 57° , а по показателю поглощения в этом случае для всех углов падения достаточно большая, но минимальная ошибка соответствует углу падения 56° .

Также, кроме стекла, были рассмотрены подложки и из других материалов. Для них тоже были определены значения эллипсометрических углов и оптических постоянных и построены соответствующие графики. Согласно полученным результатам наибольшую точность в определении оптических постоянных полубесконечной среды можно получить при определении значений вблизи угла Брюстера.

Результаты решения прямой задачи эллипсометрии для системы «Прозрачная плёнка – Прозрачная подложка»

При решении прямой задачи эллипсометрии была ориентация на основную формулу (8) и итоговые формулы (3) и (4). С помощью машинного эксперимента были получены графики зависимости эллипсометрических углов от угла падения. В качестве подложки было выбрано стекло ($N_0 = 1.514 - 0.00002i$), а плёнки рассматривались с различными показателями преломления. Толщина плёнки была фиксированной и составляла 10 нм. Получившиеся зависимости представлены на рисунке 6.

Рис. 6. Зависимость эллипсометрического угла от угла падения: а) $\Psi(\varphi)$; б) $\Delta(\varphi)$.



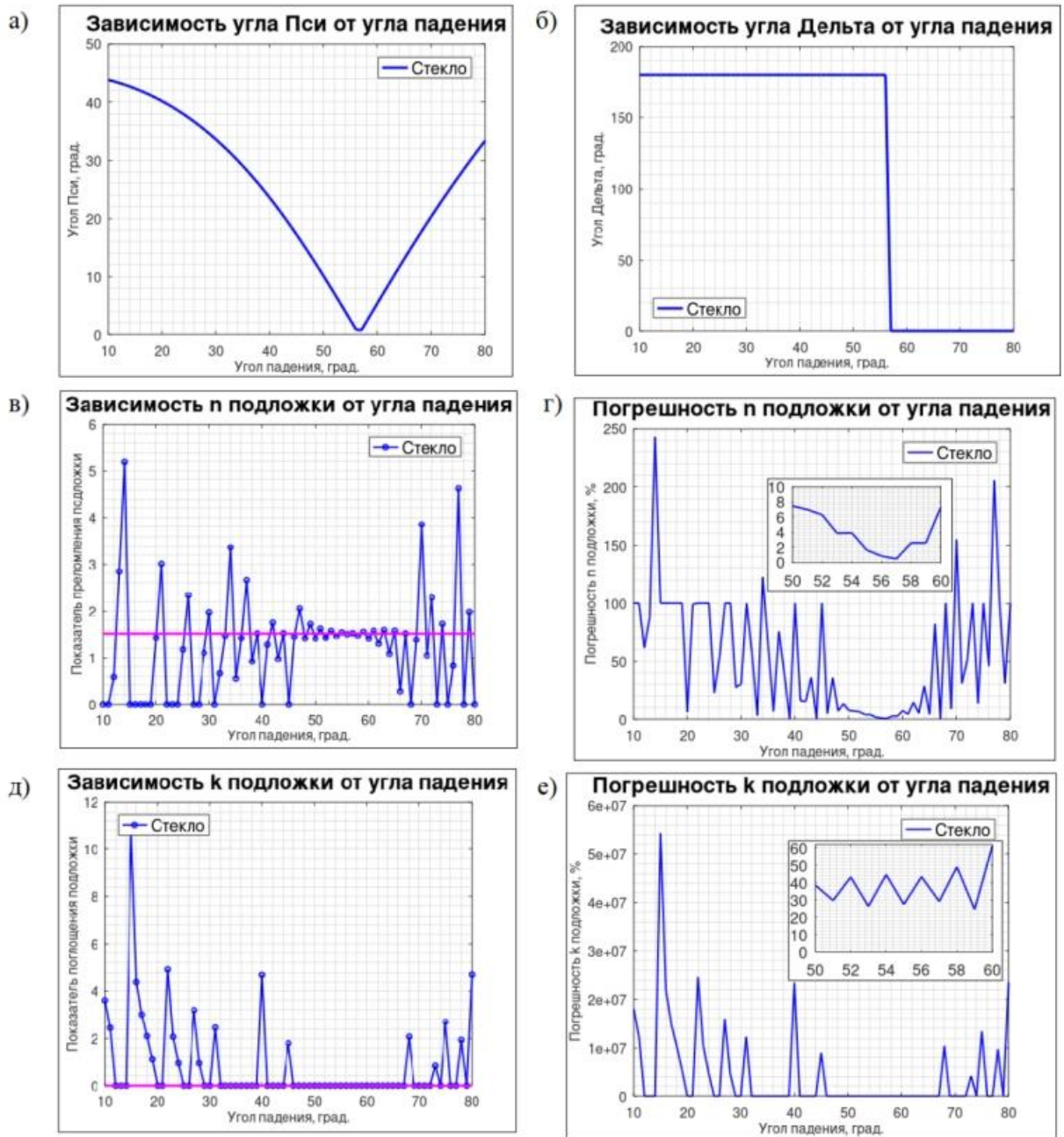


Рис. 5. Зависимости для чистого стекла с табличным показателем преломления $N = 1.514 - 0.00002i$: а) $\Psi(\varphi)$; б) $\Delta(\varphi)$; в) Зависимость показателя преломления плёнки от угла падения $n(\varphi)$; г) Зависимость погрешности показателя преломления плёнки от угла падения $\Delta n(\varphi)$; д) Зависимость показателя поглощения от угла падения $k(\varphi)$; е) Зависимость погрешности показателя поглощения от угла падения $\Delta k(\varphi)$

Видно, что значения показателей преломления влияют на вид зависимостей. Из данных графиков (рис. 6) следует, что если показатель преломления плёнки больше, чем показатель преломления стекла, то угол Δ увеличивается с ростом угла падения, и наоборот, если показатель преломления плёнки меньше значения показателя преломления стекла, то угол Δ уменьшается с ростом угла падения.

Из полученных графиков и таблиц видно, что все измерения нужно проводить вблизи угла Брюстера, так как вблизи этого угла вещество наиболее сильно реагирует на падающий луч света.

Результаты машинного моделирования решения обратной задачи эллипсометрии для системы «Прозрачная плёнка на подложке» по методу Холмса

Для решения данной задачи мы опирались на основные формулы (10-12). По данным формулам была написана компьютерная программа на языке «Octave», с помощью которой определялись значения показателя преломления и толщины плёнки. Полученные данные представлены в таблице № 2. Во всех случаях использовалась кремниевая подложка с известными оптическими параметрами ($N_2 = 3.865 + 0.023 \cdot i$), угол падения был равен 70° .

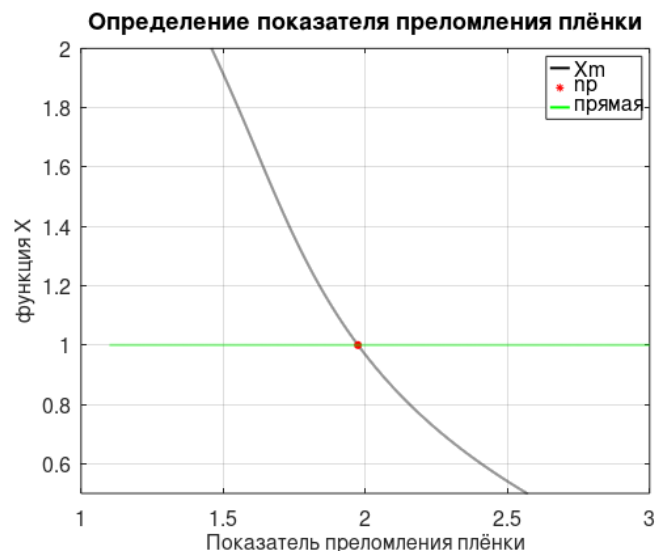
Таблица № 2 – Результаты моделирования по методу Холмса

№	n_{10}	$d_0, \text{Å}$	$\Psi, ^\circ$	$\Delta, ^\circ$	n_1	\pm	$d, \text{Å}$	$\pm, \text{Å}$
1	1.89	1222	34.295	305.44	1.9739	0.08385	1285.4	63.378
2	1.8	1222	42.814	310.90	2.5883	0.7883	1064.4	157.59
3	1.89	2000	11.004	155.17	3.7435	1.8536	2463.6	463.65

Также на рисунке 7 представлено определение показателя преломления плёнки для примера 1 из таблицы № 2.

Рис. 7. Определение показателя преломления плёнки по методу Холмса.

Результаты машинного моделирования решения обратной задачи



**эллипсометрии для системы «Прозрачная плёнка на подложке» по методу
Кацубы**

Пробуя решить данную задачу, мы опирались на формулы (13-15).

Была написана программа на языке «Octave», с помощью которой определялись значения показателя преломления и толщины плёнки. С полученными данными можно ознакомиться в таблице № 3.

Подложка во всех случаях была стеклянная с известными оптическими параметрами ($n_2 = 1.514 - 0.00002 \cdot i$), угол падения был равен 56° , значения эллипсометрических углов для чистой подложки были равны $\Psi_0 = 0.866389^\circ$ и $\Delta_0 = 179.964^\circ$, предполагаемая толщина плёнки бралась равной 150 ангстрем, а предполагаемый показатель преломления плёнки варьировался от 1.1 до 1.5.

Таблица № 3– Значения показателя преломления и толщины плёнки в зависимости от предполагаемого значения показателя преломления плёнки

№	n_{10}	$d_0, \text{Å}$	$\Delta, ^\circ$	n_1	\pm	$d, \text{Å}$	$\pm, \text{Å}$
1	1.1	150	128.72	1.4835	0.3835	867.50	717.50
2	1.2		118.13		0.2835	1047.2	897.17
3	1.3		117.34		0.1835	1060.5	910.54
4	1.4		127.67		0.083540	885.67	735.67
5	1.5		170.78		0.016460	155.47	5.4746

Также было проведено изучение точности значений толщины для тонких плёнок. Результаты данного исследования представлены в таблице № 4.

Таблица № 4 – Зависимость точности решения от толщины плёнки

№	n_{10}	$d_0, \text{Å}$	$\Delta, ^\circ$	n_1	\pm	$d, \text{Å}$	$\pm, \text{Å}$
1	1.5	20	178.8	1.4835	0.01646	19.705	0.2948
2		15	179.11			14.457	0.5428
3		10	179.42			9.2093	0.7907
4		5	179.73			3.9614	1.0386
5		1	179.97			0.1016	0.8984

d_0 - предполагаемое значение толщины плёнки;

n_{10} – предполагаемое значение показателя преломления плёнки;
 Δ – значение эллипсометрического угла при определённых значениях n_{10}
и d_0 ;
 n_1 – получившееся значение показателя преломления плёнки;
 d – получившееся значение толщины плёнки.

В ходе работы выяснилось, что данная теория преимущественно работает только тогда, когда показатель преломления плёнки меньше, чем показатель преломления подложки.

Вывод

В данной работе представлено решение обратной задачи эллипсометрии для полубесконечной среды [1], проведено машинное экспериментирование [2] и выявлены ключевые аспекты его применения. Установлено, что аналитический метод решения этой задачи подходит исключительно для диэлектрических и полупроводниковых подложек. Оптимальные условия для достижения высокой точности измерений параметров чистых подложек определяются вблизи угла Брюстера, что значительно улучшает результаты эллипсометрических измерений. В рамках работы была разработана программа для решения прямой задачи эллипсометрии в системе «Прозрачная плёнка – Прозрачная подложка». Выяснено, что углы вблизи угла Брюстера являются наиболее чувствительными при проведении измерений. Также созданные экспериментальные образцы тонких плёнок оксида олова на стеклянных подложках позволили измерить зависимости эллипсометрических углов от угла падения [3].

Были разработаны программы по методу Холмса и методу Кацубы [4] для решения обратной задачи эллипсометрии. В ходе экспериментов установлено, что метод Холмса показывает большую относительную погрешность при измерении тонких плёнок с показателем преломления, превышающим показатель преломления подложки. В то время как метод Кацубы оказывается эффективным лишь для плёнок с показателем преломления, меньшим, чем у подложки.

Таким образом, работа предоставляет важные результаты и рекомендации по проведению эллипсометрических измерений и анализу их точности.

Литература

1. Громов В.К. «Введение в эллипсометрию», Ленинград, издательство ленинградского университета, 1986, 193 с.
2. Скалецкий Е.К., Царев З.С. Машинный эксперимент с решениями прямой задачи эллипсометрии «Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики» №2, Т.05, 2005 с.91-96
3. Федотова И.В. «Эллипсометрия тонких плёнок. Методическая разработка для студентов» - Ижевск, 1996, 60 страниц;
4. Kostruba A. High precision ellipsometry of functional, smart and biomimetic nanocoatings: monograph / A. Kostruba, Yu. Stetsyshyn, E. Koda, I. Kernytskyu, P. Osinski. – Lviv, 2021. – 56 p