

Лабораторная работа № 4
по курсу «Физика и диагностика поверхности»

Логинов Д. А., Пикулев В. Б.

Метод эллипсометрии для анализа чистых поверхностей и тонких плёнок

Петрозаводск, 2026

Содержание

1. Введение.....	1
2. Устройство и работа нуль-эллипсометра	2
3. Определение оптических параметров чистых поверхностей	5
4. Решение обратной задачи эллипсометрии в модели «среда-плёнка-подложка»..	5
5. Описание измерительной установки.....	7
6. Проведение измерений и расчётов	9
7. Список первоисточников.....	12

1. Введение

Эллипсометрия — хорошо зарекомендовавший себя оптический бесконтактный неразрушающий метод исследования поверхностей и тонких плёнок, основанный на анализе изменения поляризации света при отражении от исследуемого образца. Этот метод широко применяется в науке и промышленности, особенно там, где проводится работа с функциональными нанопокровтиями. Чаще всего метод используется для быстрого и точного определения толщины и показателя преломления плёнки, выросшей на подложке, с точностью до субнанометрового уровня.

Типичные области применения эллипсометрии – перспективные исследования новых материалов и покрытий в научных лабораториях, анализ продукции в отраслевых и производственных лабораториях микро- и наноэлектроники, энергетики, при проведении химических и биохимических исследований.

Основные преимущества эллипсометрии:

1. высокая чувствительность при измерении толщины тонких плёнок (от долей нанометра), что позволяет изучать атомные монослои, плёнки Легмюра-Блоджетт и биологические мембраны;
2. неразрушающий контроль в любой внешней атмосфере — отсутствует механическое и химическое воздействие на образец, поскольку небольшая мощность лазерного излучения не приводит ни к люминесценции, ни к нагреву исследуемых материалов;
3. мониторинг процессов в реальном времени (так называемые измерения *in situ*), что позволяет изучать кинетики роста или травли плёнок.

Эллипсометрические измерения можно проводить как в проходящем свете (просвечивающая эллипсометрия), так и в отражённом свете (отражательная эллипсометрия). Наиболее широкое распространение получила именно отражательная эллипсометрия. Это обусловлено тем, что множество наиболее интересных для индустрии материалов (в первую очередь это полупроводники и металлы) обычно непрозрачны. В пользу отражательной эллипсометрии говорит то, что отражённая волна формируется в достаточно тонком приповерхностном слое исследуемого образца. Это означает, что, исследуя образцы именно в отражённом свете, можно получить ценную информацию о свойствах и структуре приповерхностного слоя вещества. Это делает явление отражения света интересным для исследования адсорбции различных веществ на отражающие поверхности, поверхностных и граничных явлений, катализа, быстропотекающих реакций на поверхности [1-6].

При интерпретации результатов эллипсометрических измерений, полученных при отражении или пропускании поляризованного света чистыми подложками или материалом с нанесёнными на него плёнками используется классическая электромагнитная теория света. Эта теория позволяет получать выражения для комплексных амплитудных коэффициентов пропускания и отражения в терминах макроскопических оптических свойств, характеризующих конкретную изучаемую структуру [5].

2. Устройство и работа нуль-эллипсометра

В эллипсометрическом эксперименте линейно поляризованный свет (ЛПС, обычно это лазерное излучение) падает на поверхность образца под фиксированным ненулевым углом. Компонента электрического поля, лежащая в плоскости падения (*p*-поляризация) и перпендикулярная ей (*s*-поляризация), при отражении претерпевают различные амплитудные и фазовые изменения вследствие особенностей взаимодействия электрического поля волны с атомной структурой материала (рис. 1). В результате отражённый пучок приобретает эллиптическое состояние поляризации (ЭПС), отличное от исходного. Именно параметры этого эллипса несут ценную информацию о свойствах образца.

В оптической схеме типичного лазерного отражательного нуль-эллипсометра (рис. 2) излучение от лазера через систему зеркал проходит через пластинку $\lambda/4$, которая преобразует ЛПС лазера в циркулярно-поляризованный свет (ЦПС). Затем свет проходит через призму поляризатора (Глана–Томсона, Глазбрука, Франка-Риттера и др. [6]), который может вращаться вокруг своей оси. Тем самым на выходе поляризатора мы получаем ЛПС с произвольно устанавливаемым углом поворота вектора напряжённости электрического поля

волны относительно плоскости образца. Угол падения света определяется наклоном плеча поляризатора относительно плоскости образца.

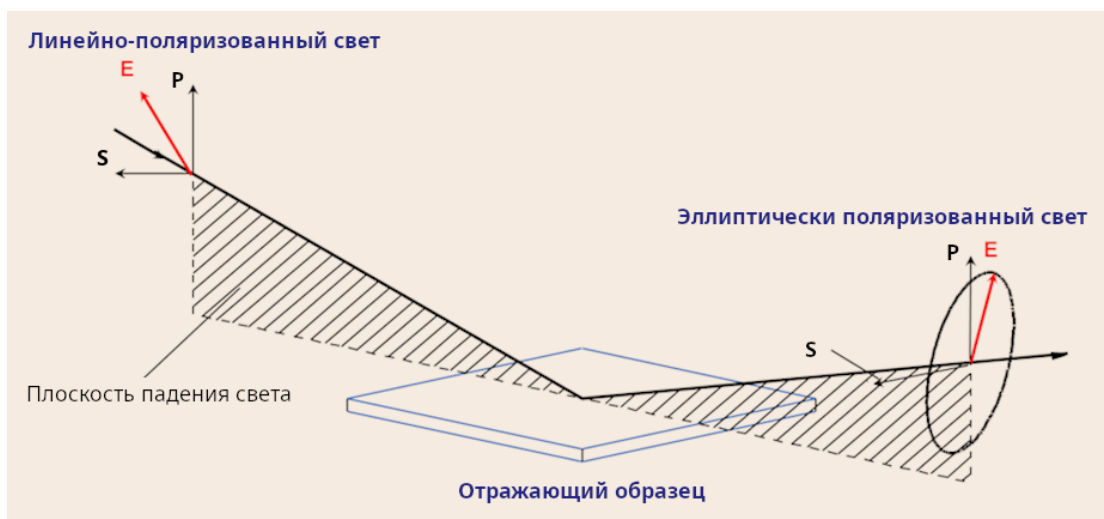


Рисунок 1. Изменение поляризации света при взаимодействии с веществом.

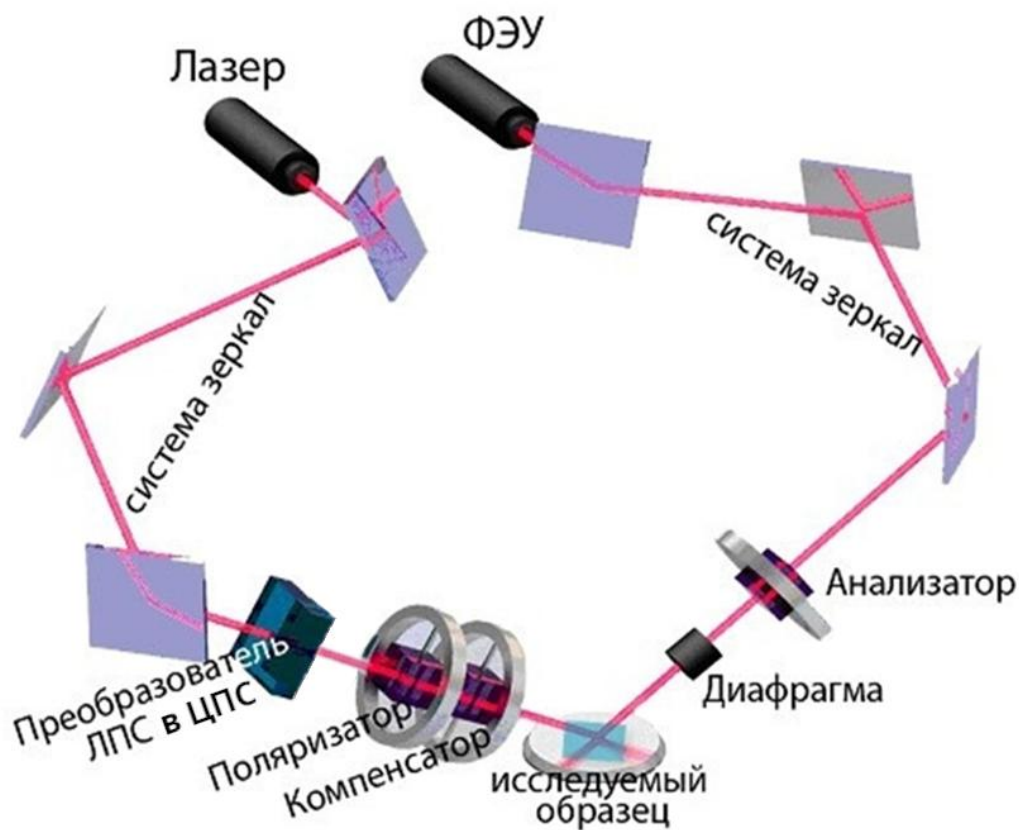


Рисунок 2. Типичная оптическая схема отражательного нуля-эллипсометра.

Далее на пути светового пучка расположена пластина компенсатора, угол поворота которой также можно регулировать. Компенсатор делает из ЛПС свет эллиптически-поляризованный, и необходимость этого шага будет разъяснена далее.

Затем ЭПС падает на образец и отражается, взаимодействуя с ним. Образец изменяет соотношение амплитуд и фаз p - и s -компонент вектора напряжённости электрического поля световой волны, изменяя эллиптичность света, что обусловлено конкретными оптическими характеристиками исследуемого материала. После этого свет попадает в плечо анализатора, установленное под тем же углом к поверхности образца, что и плечо поляризатора. Свет проходит через кристалл анализатора, который также может вращаться вокруг своей оси, и попадает на светочувствительный детектор, в качестве которого используется фотоэлектронный умножитель (ФЭУ) или полупроводниковый фотодиод. Анализатор, поляризатор и компенсатор снабжены шкалами, показывающими углы поворота кристаллов, обычно с точностью до одной угловой минуты.

Если на входе анализатора мы имеем ЭПС, то как бы мы не поворачивали анализатор, свет мы не погасим. Но если мы подберём углы поворота поляризатора и компенсатора так, что при отражении от образца получится ЛПС, то мы легко сможем полностью перекрыть световой пучок, подобрав соответствующее положение анализатора. Зная значения всех трёх углов, мы можем вычислить, какое же изменение амплитуды и фазы между компонентами вектора напряжённости электрического поля даёт нам образец и, воспользовавшись этими цифрами, рассчитаем оптические характеристики образца. Таким образом, идея метода отражательной нуль-эллипсометрии заключается в поиске такой взаимной ориентации поляризатора, анализатора и компенсатора, при которой интенсивность регистрируемого фотоприёмником линейно поляризованного света, проходящего через оптическую систему с учётом отражения от исследуемого образца, становится минимальной.

Непосредственными результатами эллипсометрического измерения являются две угловых величины: Ψ – угол, связанный с отношением амплитуд коэффициентов отражения для p - и s -поляризаций, и Δ – разность фаз между этими компонентами после отражения. Связь измеряемых параметров с комплексным коэффициентом отражения ρ исследуемого образца задаётся **основным уравнением эллипсометрии** [1-4]:

$$\rho = \frac{r_p}{r_s} = \operatorname{tg} \Psi \cdot e^{i\Delta}, \quad (1)$$

где ρ – относительный коэффициент отражения поляризованного излучения, r_p и r_s — комплексные амплитудные коэффициенты отражения Френеля для p - и s - компонент электрической составляющей электромагнитной волны, соответственно. Влиянием взаимодействия магнитного поля образцов на магнитную составляющую световой волны мы пренебрегаем, поскольку для преобладающего большинства исследуемых материалов это взаимодействие никак себя не проявляет.

Угол $\Psi \in [0^\circ, 90^\circ]$ соответствует положению анализатора (выбранному в наиболее подходящем квадранте). Угол $\Delta \in [0^\circ, 360^\circ]$ считается как разность между углом компенсатора и поляризатора (с приведением значения в нужный диапазон); значения 0° и 180° отвечают линейной поляризации отражённого пучка [3, 4]. При измерениях угол компенсатора и угол падения света на образец выбираются априори в зависимости от материала подложки; измерения проводят, подбирая значения углов поляризатора и анализатора.

3. Определение оптических параметров чистых поверхностей

Рассмотрим наиболее простую модель чистой поверхности для оптически поглощающих материалов. В этом случае дадим оптическим характеристикам внешней среды индекс 0, а характеристикам исследуемого материала – индекс 1. То есть, **комплексный** показатель преломления материала введём как $\tilde{n}_1 = n_1 - ik_1$, а для внешней среды $\tilde{n}_0 = n_0 - ik_0$. Здесь n – показатель преломления, k – показатель поглощения. Однако будем считать, что мнимая часть показателя преломления внешней среды $k_0 = 0$, то есть примем, что воздух на малых расстояниях от образца не поглощает излучение лазера.

В этом случае **формулы Френеля** для коэффициентов отражения будут иметь вид:

$$r_S = \frac{n_0 \cos \theta_i - \tilde{n}_1 \cos \theta_t}{n_0 \cos \theta_i + \tilde{n}_1 \cos \theta_t} \quad (2a)$$

$$r_P = \frac{\tilde{n}_1 \cos \theta_i - n_0 \cos \theta_t}{\tilde{n}_1 \cos \theta_i + n_0 \cos \theta_t}, \quad (2b)$$

где θ_i – угол падения светового луча на поверхность образца, θ_t – угол преломления соответствующего луча. Согласно закону Снеллиуса:

$$\tilde{n}_1 \sin \theta_t = n_0 \sin \theta_i. \quad (3)$$

Убрав в формулах (2a), (2b) с помощью (3) угол θ_t с помощью простых тригонометрических преобразований, подставим полученные выражения для коэффициентов Френеля в основное уравнение эллипсометрии (1). Мы получим такое выражение:

$$\operatorname{tg} \Psi \cdot e^{i\Delta} = - \frac{\sin \theta_i \operatorname{tg} \theta_i - \sqrt{(\tilde{n}_1/n_0)^2 - \sin^2 \theta_i}}{\sin \theta_i \operatorname{tg} \theta_i + \sqrt{(\tilde{n}_1/n_0)^2 - \sin^2 \theta_i}}. \quad (4)$$

Из этой формулы (см. также 1) можно найти неизвестные оптические характеристики нашего материала по известным эллипсометрическим углам в аналитическом виде (так называемая **обратная задача эллипсометрии**):

$$\tilde{n}_1 = n_0 \sin \theta_i \sqrt{\left(\frac{1-\rho}{1+\rho} \operatorname{tg} \theta_i\right)^2 + 1}. \quad (5)$$

Обратим внимание, что выражение (5) вычисляется в комплексном виде, при этом мы получаем решение для показателя преломления материала n_1 (действительная часть $\tilde{n}_1$) и для показателя поглощения k_1 (мнимая часть $\tilde{n}_1$). Задача определения оптических параметров чистых поверхностей – единственная обратная задача эллипсометрии, которая решается в аналитическом виде [1, 2, 6].

4. Решение обратной задачи эллипсометрии в модели «среда-плёнка-подложка»

Предположим, что теперь однородная поверхность образца покрыта однородной изотропной полупрозрачной плёнкой. Для системы «окружающая среда (0) — плёнка (1) — подложка (2)», изображённой на рис. 3, коэффициенты Френеля на верхней границе раздела (0-1) имеют вид:

$$r_{01}^p = \frac{\tilde{n}_1 \cos \theta_0 - \tilde{n}_0 \cos \theta_1}{\tilde{n}_1 \cos \theta_0 + \tilde{n}_0 \cos \theta_1} \quad (6a)$$

$$r_{01}^s = \frac{\tilde{n}_0 \cos \theta_0 - \tilde{n}_1 \cos \theta_1}{\tilde{n}_0 \cos \theta_0 + \tilde{n}_1 \cos \theta_1} \quad (6b)$$

где $\tilde{n}_0, \tilde{n}_1, \tilde{n}_2$ — комплексные показатели преломления соответствующих сред;

$\theta_i, \theta_1, \theta_2$ — углы в соответствующих средах, связанные законом Снеллиуса $\tilde{n}_0 \sin \theta_i = \tilde{n}_1 \sin \theta_1 = \tilde{n}_2 \sin \theta_2$.

Аналогичным образом записываются коэффициенты $r_{12}^{\{p,s\}}$ на нижней границе раздела (1-2).

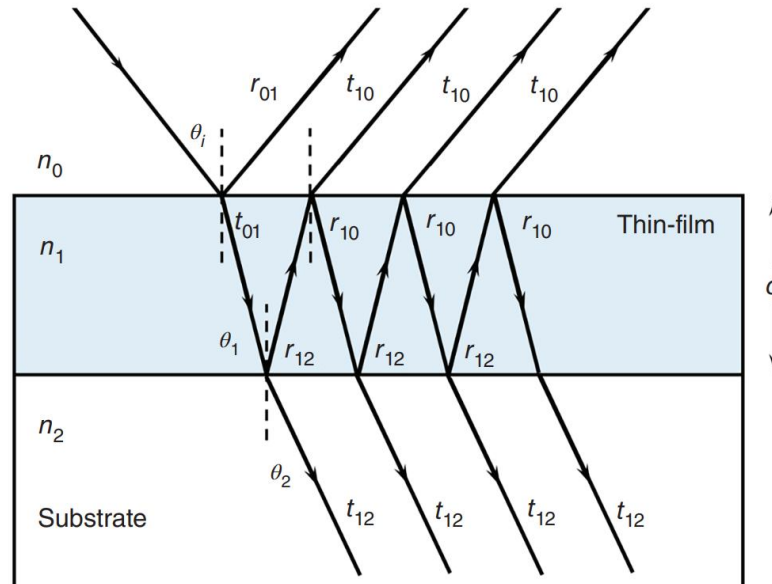


Рисунок 3. Оптическая модель системы «среда–плёнка–подложка».

Суммарные коэффициенты отражения от системы «среда–плёнка–подложка» с учётом многократных интерференционных отражений внутри плёнки определяются формулами Эйри [4, 5]:

$$r_p = \frac{r_{01}^p + r_{12}^p \cdot e^{-2i\beta}}{1 + r_{01}^p \cdot r_{12}^p \cdot e^{-2i\beta}} \quad (7a)$$

$$r_s = \frac{r_{01}^s + r_{12}^s \cdot e^{-2i\beta}}{1 + r_{01}^s \cdot r_{12}^s \cdot e^{-2i\beta}} \quad (7b)$$

где β – фазовая толщина плёнки, описывающая набег фазы при двукратном прохождении:

$$\beta = \frac{2\pi}{\lambda} \cdot \tilde{n}_1 \cdot d \cdot \cos \theta_1 \quad (8)$$

где $\tilde{n}_1 = n_1 - ik_1$ — комплексный показатель преломления плёнки,

n_1 — показатель преломления (действительная часть);

k_1 — коэффициент экстинкции (показатель поглощения);

d — толщина плёнки;

λ — длина волны в вакууме;

θ_1 — угол преломления внутри плёнки.

Подстановка формул (6) – (8) в уравнение (1) даёт связь измеряемых параметров Ψ и Δ с искомыми n_1, k_1, d . Полученное уравнение называют **уравнением Друде**:

$$\operatorname{tg} \Psi \cdot e^{i\Delta} = \frac{r_{01}^p + r_{12}^p \cdot e^{-2i\beta}}{1 + r_{01}^p \cdot r_{12}^p \cdot e^{-2i\beta}} \frac{1 + r_{01}^p \cdot r_{12}^p \cdot e^{-2i\beta}}{r_{01}^s + r_{12}^s \cdot e^{-2i\beta}}. \quad (9)$$

Поскольку у нас два экспериментально получаемых параметра, и мы имеем систему двух (в комплексном представлении) уравнений, то решив эти уравнения, мы получим значения любых двух параметров, которые считаем неизвестными. Чаще всего, такими параметрами являются толщина плёнки d и её показатель преломления n_1 . При этом все остальные оптические параметры системы ($\tilde{n}_2$ подложки и $\tilde{n}_1$ среды, а также показатель поглощения плёнки) должны быть нам известны с высокой точностью.

Основная проблема решения обратной задачи эллипсометрии в данном случае — доказанная невозможность получения аналитической формулы для проведения вычислений. Поэтому для её решения используются численные методы и соответствующие программные алгоритмы. Чаще всего применяется алгоритм поиска минимума среднеквадратичного отклонения между вычисленными и полученными в эксперименте значениями двух независимых координат Ψ и Δ (оптимизация целевой функции), однако это далеко не единственный способ численного решения обратной задачи эллипсометрии.

5. Описание измерительной установки

В данной работе для проведения исследований используется эллипсометр ЛЭФ-3М (лазерный эллипсометрический фотометр, третья модель, модернизированный), произведённый в СССР в 1979 году. Прибор был восстановлен и автоматизирован в 2026 году в рамках студенческого научного гранта «по поддержке прикладных научных исследований и разработок студентов, аспирантов и лиц, имеющих учёную степень, обеспечивающих значительный вклад в инновационное развитие отраслей экономики и социальной сферы Республики Карелия, на 2026–2027 годы». Вычислительным ядром новой системы управления является микроконтроллер Teensy 4.0 на основе процессорного ядра NXP i.MX RT1060. Управление измерительным процессом осуществляется через внешний компьютер, соединённый с блоком управления эллипсометра через USB-интерфейс. Общий вид прибора приведён на рис. 4.

Источником монохроматического излучения служит непрерывный газовый He–Ne лазер мощностью 1 мВт с длиной волны $\lambda = 632.8$ нм. Поляризатор и анализатор смонтированы на лимбах с основной ценой деления 1° ; нониус обеспечивает отсчёт с точностью до 1 угловой

минуты. Угол падения светового пучка на образец перестраивается в диапазоне 45° – 90° . В конструкции прибора применен механизм, обеспечивающий синхронный поворот (подъем или опускание) плеч поляризатора и анализатора. В стандартном режиме измерений угол падения составляет 65° к нормали поверхности — значение, выбранное вблизи угла Брюстера кремния, что обеспечивает максимальную чувствительность к тонким диэлектрическим плёнкам на кремниевой подложке. Регистрация сигнала ФЭУ осуществляется через преобразователь «напряжение-частота», что устраняет главный недостаток прежней электрической схемы данного прибора – постоянную ручную подстройку коэффициента усиления, которая требовалась для получения адекватных показаний стрелочного измерительного прибора (отсутствующего в новом блоке управления).



Рис. 4. Общий вид прибора ЛЭФ-3М с блоком управления

Технические характеристики эллипсометра ЛЭФ-3М:

Диапазон измерения угла Ψ	$0^{\circ} — 90^{\circ}$
Диапазон измерения угла Δ	$0^{\circ} — 360^{\circ}$
Точность отсчёта по лимбу (нониус)	$0,017^{\circ}$

Диаметр лазерного пятна на образце	≈ 1 мм
Фотодетектор	Прецизионный ФЭУ-128
Режим измерений	Ручной метод (PCSA), полуавтоматическое либо полностью автоматизированное измерение
Диапазон исследуемых толщин плёнок	От 0 до 316 нм, выше 316 – с учётом априорных поправок на известную толщину. Точность измерения толщины производителем не декларируется.

Система управления эллипсометром включает в себя:

- Внешний управляющий компьютер, работающий под ОС Linux Debian, с программой управления DAVS, написанной на языке Python. Через графический интерфейс данной программы осуществляются все действия с эллипсометром в автоматизированном режиме измерений.
- Блок управления, имеющий на лицевой панели кнопки включения основных блоков эллипсометра, кнопки управления режимами работы эллипсометра, регулятор высокого напряжения, подаваемого на ФЭУ, два ЖК-экрана, обеспечивающих визуализацию информации по текущему режиму работы прибора. Манипулировать кнопками блока управления следует только при включении, выключении и работе в ручном либо полуавтоматическом режиме. Все операции осуществлять с разрешения и под контролем преподавателя, регулятор высокого напряжения не трогать.
- Видеокамеры и шаговые двигатели непосредственно на корпусе эллипсометра, обеспечивающие управление движением анализатора и поляризатора через программное обеспечение. Трогать категорически запрещено.
- Ручки настройки на корпусе эллипсометра, необходимые для юстировки образца относительно лазерного луча при его установке, и юстировке лазерного луча относительно окна ФЭУ для обеспечения высокой интенсивности сигнала. Производить настройку следует с осторожностью и пониманием, в первый раз – обязательно под контролем преподавателя.

6. Проведение измерений и расчётов

6.1. Подготовка к проведению измерений. Юстировка образцов.

- Перед началом работы ознакомьтесь с инструкцией по работе с эллипсометром на рабочем месте, а также пройдите инструктаж со стороны преподавателя по работе с прибором и по технике безопасности при проведении соответствующих работ.
- Включите устройства в такой последовательности: управляющий компьютер, блок управления эллипсометром, затем, не ранее чем через 10 секунд, лазер и высокое напряжение на ФЭУ. Запустите программу DAVS. Проведите инициализацию прибора.

- Положите образец «кремний КЭФ-0.3» на предметный столик эллипсометра. Используйте для этого пинцет, старайтесь не касаться поверхности образца руками. С помощью ручки подъёма-опускания столика добейтесь того, чтобы луч лазера отражался от образца на входную диафрагму анализатора. Внимание: ручка имеет стопорный рычаг, перед юстировкой снимите стопор, после юстировки – вновь установите.
- Поверните переключатель поворота зеркала лазерного пучка в плече анализатора в положение «вверх», при этом пучок будет направлен на матовый экран юстировки. Последовательно вращайте три юстировочных ручки, расположенные по краям предметного столика, чтобы точно спозиционировать лазерное пятно в центр юстировочного экрана. При удачной юстировке в центре лазерного пятна будет заметна тёмная точка. После этого верните переключатель в рабочее положение.
- Убедитесь, что компенсатор эллипсометра стоит в положении «135°». Если это не так, поверните компенсатор на указанный угол с помощью соответствующего управляющего колёсика. Убедитесь, что угол наклона плеч эллипсометра составляет 65°. Если это не так, маховиком управления плечами эллипсометра установите нужный угол.
- От времени включения прибора до начала фактических измерений должно пройти не менее 15 минут.

6.2. Измерения эллипсометрических параметров чистых поверхностей.

- Выберите режим «Измерение эллипсометрических параметров» из меню программы DAVS. Убедитесь, что начальные углы анализатора, поляризатора и компенсатора, а также угол падения излучения на образец соответствуют их значениям в эллипсометре.
- Запустите измерение, в результате которого программа будет пытаться найти положения анализатора и поляризатора, обеспечивающие минимум интенсивности лазерного излучения на выходе анализатора. Текущие значения интенсивности излучения показываются на мониторе блока управления. В результате измерения программа должна выдать вам значения эллипсометрических углов Ψ и Δ .
- Если в результате измерений возникли ошибки, или есть сомнения в правильности полученных значений – повторите сначала юстировку образца, а затем вновь проведите измерение.
- Аналогичным образом установите и измерьте второй образец («кремний КДБ-10») и третий образец («сапфир»).

6.3. Расчёт оптических характеристик для чистых поверхностей.

- Используйте полученные значения эллипсометрических углов Ψ и Δ для расчёта показателей преломления и поглощения исследованных вами образцов. Для этого вам потребуется подставить эти значения в формулу (5). Обратите внимание, что расчёты следует проводить в комплекснозначной арифметике, для этого лучше всего написать небольшую программу на языке Python, либо воспользоваться системами для научных расчётов (SciLab, Mathlab, Wolfram и др.). В расчётах возьмите

значения показателя преломления внешней среды (воздух) = 1, показателя поглощения внешней среды = 0.

- Сравните полученные вами значения с табличными, применив поиск в сетевых базах данных по характеристикам материалов, либо с помощью ИИ. Оформите результаты в отчёте и сделайте выводы.

6.4. Измерения оптических характеристик тонких плёнок.

- Положите образец «кремний-оксид кремния» на предметный столик эллипсометра. Проведите юстировку лазерного пучка в соответствии с п. 6.1.
- Выберите режим «Измерение эллипсометрических параметров» из меню программы DAVS. Убедитесь, что начальные углы анализатора, поляризатора и компенсатора, а также угол падения излучения на образец соответствуют их значениям в эллипсометре.
- Запустите измерение, в результате которого программа определит значения эллипсометрических углов Ψ и Δ . Если в результате измерений возникли ошибки, или есть сомнения в правильности полученных значений – повторите сначала юстировку образца, а затем вновь проведите измерение.
- Выберите режим «Расчёт параметров в модели "среда-плёнка-подложка"». Установите значения показателя преломления внешней среды (воздух) = 1, показателя поглощения внешней среды = 0. Установите значения показателя преломления подложки (кремний) = 3.882, показателя поглощения подложки = 0.019. Включите поиск значений толщины плёнки и показателя преломления плёнки в диапазонах 0...315 нм и 1...4, соответственно. Установите фиксированное значение коэффициента поглощения плёнки (оксид кремния) = 0 (считаем плёнку полностью прозрачной). Выберите любой из предложенных программой методов решения обратной задачи эллипсометрии и получите результат. Попробуйте поменять метод расчёта и посмотрите, согласуются ли полученные результаты между собой.
- Возьмите для исследования следующий образец «кремний-нитрид кремния». Выполните измерения так же, как и в предыдущем случае. Для расчётов возьмите коэффициент поглощения плёнки нестехиометрического нитрида кремния равным 0.001. Получите результат с помощью разных расчётных методов.
- Сравните полученные вами значения с табличными, применив поиск в сетевых базах данных по характеристикам материалам, либо с помощью ИИ. Оформите результаты в отчёте и сделайте выводы.

6.5. Завершение работы.

- Аккуратно сложите использованные вами образцы обратно в контейнер. Используйте для этого пинцет, старайтесь не касаться поверхности образцов руками.
- Закройте программу управления эллипсометром.

- Выключите установку в такой последовательности: сначала выключите высокое напряжение на ФЭУ, затем выключите лазер, затем – блок управления эллипсометром и, в заключение, управляющий компьютер.

7. Список первоисточников

1. Azzam R.M.A., Bashara N.M. Ellipsometry and Polarized Light. – Amsterdam: North-Holland, 1977. – 529 p.
2. Громов В.К. Введение в эллипсометрию. – Л.: Изд-во ЛГУ, 1986. – 192 с.
3. Tompkins H.G., McGahan W.A. Spectroscopic Ellipsometry and Reflectometry: A User's Guide. – New York: Wiley, 1999. – 262 p.
4. Горшков В.А., Гринёв В.Н. Эллипсометрия тонких плёнок. – М.: Наука, 1991. – 248 с.
5. Born M., Wolf E. Principles of Optics. 7th ed. – Cambridge: Cambridge University Press, 1999. – 952 p.
6. Скалецкая И. Е. Введение в прикладную эллипсометрию. Учебное пособие по курсу «ОПТИЧЕСКИЕ ИЗМЕРЕНИЯ». Часть 2. Свойства решений ОУЭ для однородных слоёв – СПб.: ИТМО, 2007. – 172 с.