

2.6. ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 6. СВЕТОВАЯ МИКРОСКОПИЯ: ЭЛЛИПСОМЕТРИЯ

Цель работы: получить практические навыки в области подготовки и исследования оптических параметров и толщин оптически прозрачных и полупрозрачных слоев многослойных структур на двухканальном эллипсометре «Эльф» (www.nanotech.ru).

Задание по работе

1. Изучить устройство эллипсометра «Эльф» [1]. Выбрать один из предназначенных для проведения работы образцов: один из образцов по выбору преподавателя.
2. Изучить технические характеристики и принцип работы эллипсометра «Эльф».
3. Освоить основы работы с программным обеспечением эллипсометра.
4. Проверить настройку эллипсометра. Провести калибровку.
5. Провести спектральное исследование выбранного образца.
6. Провести обработку результатов исследований и построить эллипсометрическую модель.

Методические указания по выполнению работы

Устройство эллипсометра. Спектральный эллипсометр «Эльф» [1] состоит из малогабаритного дифракционного монохроматора, управляемого компьютером с помощью шагового двигателя, блока питания, оптико-механической части эллипсометра и электронной системы управления, сопряжения и регистрации эллипсометрических параметров с комплектом программного обеспечения на языке *Visual C*.

Технические характеристики. Спектральный диапазон длин волн: 380–1050 нм.

Спектральное разрешение: 2,5–4 нм в зависимости от установленной входной щели монохроматора.

Воспроизводимость и стабильность при измерении:

эллипсометрических параметров Ψ и Δ без микроприставки в диапазоне длин волн 400–1000 нм – не хуже 0,01°;

толщины – не хуже 0,1 нм*;

показателя преломления – 0,005*.

Диапазон устанавливаемых углов падения: 45°–90° с интервалом 2,5°.

Диапазон измеряемых толщин: 0,1 нм–5 мкм*.

Диаметр светового луча: 3 мм (200 мкм с микроприставкой).

Типичное время измерения на одной длине волны: 0,5–2 с.

Дискретность измерений – до 400 точек на спектр.

* Цифры приведены для тестовой системы SiO₂/Si.

Принцип работы. Излучение от осветителя, содержащего галогенную лампу и сферическое зеркало, поступает на входную щель монохроматора. Длина волны на выходе монохроматора устанавливается с помощью шагового двигателя, управляемого компьютером. Монохроматический свет с выхода монохроматора поступает через волоконный кабель на блок поляризатора. Блок поляризатора содержит расположенные по ходу пучка сферическое зеркало с фокусным расстоянием 100 мм, плоские зеркала, клин из кальцита. Ортогонально поляризованные пучки сферическим зеркалом фокусируются в плоскости диска обтюлятора и сферическим зеркалом сводятся (совмещаются) на клин, который снова совмещает ортогонально поляризованные пучки с первоначальным направлением пучка излучения. Клин, сферические зеркала и обтюлятор с шаговым микродвигателем, управляемым от ПК, составляют переключатель состояния поляризации (ПСП). Диск обтюлятора прерывает ортогонально поляризованные пучки. В отраженных от клина лучах установлен опорный фотодиод, измеряющий падающую на поляризатор интенсивность света.

После поляризатора установлен ахроматический компенсатор, содержащий ромб Френеля из плавленого кварца (угол при вершине 54°) и два плоских зеркала, расположенных под углом 15° к падающему на них излучению. Компенсатор устанавливается на пути луча с помощью штыря, который нужно вдвинуть внутрь до упора. Для отключения компенсатора штырь необходимо выдвинуть на себя до упора.

Основной пучок излучения после компенсатора падает на исследуемый образец. Отраженное от образца излучение поступает на блок анализатора. Блок анализатора содержит клин из кальцита, аналогичный клину в поляризаторе. После прохождения клина два луча с ортогональной поляризацией после отражения от сферических зеркал поступают на 2 фотодиода. Сигналы с фотодиодов поступают на схему управляемых интеграторов и далее через разъем – на блок сопряжения для оцифровки 18-разрядным АЦП. Каждый из 2-х лучей, выходящих из поляризатора, расщепляется на 2 в анализаторе. Таким образом, измеряются 4 сигнала, а также фон на каждом фотодиоде при перекрытом обтюратором луче в поляризаторе. Фон вычитается из сигналов, поэтому измеряемые величины не зависят от постоянной интенсивности фона. Но поскольку сигналы и фон измеряются в разное время, меняющийся в процессе измерения фон может исказить результат или добавить шумы.

Азимуты ПСП устанавливаются с помощью лимбов. Более точные значения азимутов поляризатора и анализатора измеряются с помощью калибровок.

В эллипсометрии измеряется относительный фазовый сдвиг двух ортогонально поляризованных компонент и их относительное изменение при взаимодействии пучка с образцом. Для эллипсометрии с конфигурацией поляризатор–образец–анализатор интенсивность света на фотодетекторе определяется формулой

$$I(A, P) = I_0(\sin^2 A \cdot \sin^2 P + \cos^2 A \cdot \cos^2 P \cdot \operatorname{tg}^2 \Psi + 0,5 \sin 2A \cdot \sin 2P \cdot \cos \Delta \cdot \operatorname{tg} \Psi), \quad (2.1)$$

где: P и A – азимуты поляризатора и анализатора; I_0 – коэффициент, не зависящий от P и A ; Ψ и Δ – эллипсометрические углы, определяющие отношение комплексных амплитудных коэффициентов отражения r_p и r_s для p - и s -поляризаций:

$$\rho = \frac{r_p}{r_s} = \operatorname{tg} \Psi \cdot \exp(i\Delta). \quad (2.2)$$

В данной модели спектрального эллипсометра используется оригинальный метод поляризационно-оптических измерений с переключением состояния поляризации, в котором на исследуемый образец попеременно направляется излучение с двумя ортогональными состояниями поляризации с азимутами P и $P + 90^\circ$ и анализируются сигналы на фотоприемниках для азимутов анализатора A и $A + 90^\circ$:

$$I_1 = h_a I(A, P) = h_a I_0(\sin^2 A \cdot \sin^2 P + \cos^2 A \cdot \cos^2 P \cdot \operatorname{tg}^2 \Psi + 0,5 \sin 2A \cdot \sin 2P \cdot \cos \Delta \cdot \operatorname{tg} \Psi);$$

$$I_2 = I(A + 90^\circ, P) = I_0(\cos^2 A \cdot \sin^2 P + \sin^2 A \cdot \cos^2 P \cdot \operatorname{tg}^2 \Psi - 0,5 \sin 2A \cdot \sin 2P \cdot \cos \Delta \cdot \operatorname{tg} \Psi);$$

$$I_3 = h_a I(A, P + 90^\circ) = h_a I_0(\sin^2 A \cdot \cos^2 P + \cos^2 A \cdot \sin^2 P \cdot \operatorname{tg}^2 \Psi - 0,5 \sin 2A \cdot \sin 2P \cdot \cos \Delta \cdot \operatorname{tg} \Psi);$$

$$I_4 = I(A + 90^\circ, P + 90^\circ) = I_0(\cos^2 A \cdot \cos^2 P + \sin^2 A \cdot \sin^2 P \cdot \operatorname{tg}^2 \Psi + 0,5 \sin 2A \cdot \sin 2P \cdot \cos \Delta \cdot \operatorname{tg} \Psi),$$

где: h_a – коэффициент, характеризующий отношение чувствительностей 2-х каналов в анализаторе.

Для каждого из азимуты P и $P + 90^\circ$ измеряется отношение сигналов на фотоприемниках при азимутах анализатора A и $A + 90^\circ$. По измеренным отношениям $b_1 = \frac{I_1}{I_2}$ и $b_2 = \frac{I_3}{I_4}$ определяются эллипсометрические параметры Ψ и Δ из соотношений:

$$\operatorname{tg}^2 \Psi = \frac{(x_1 - b_1 b_2 x_2 + c)}{(b_1 b_2 x_1 - x_2 + c)}; \quad (2.3)$$

$$\cos \Delta = \frac{[b_1 x_3 - \sin^2 A \cdot \sin^2 P + (b_1 x_4 - \cos^2 A \cdot \cos^2 P) \operatorname{tg}^2 \Psi]}{0,5(b_1 + 1) \sin 2A \cdot \sin 2P \cdot \operatorname{tg} \Psi}. \quad (2.4)$$

Здесь:

$$c = b_2(\sin^2 A \cdot \sin^2 P - \cos^2 A \cdot \cos^2 P) + b_1(x_4 - x_3);$$

$$x_1 = \sin^2 A, x_2 = \cos^2 A, x_3 = \cos^2 A \cdot \sin^2 P, x_4 = \sin^2 A \cdot \cos^2 P.$$

Для выбранной модели образца по измеренным величинам Ψ и Δ параметры слоев могут быть рассчитаны из известных эллипсометрических уравнений.

Основы работы с программным обеспечением. Главное окно программы состоит из меню, окон графиков и панели управления, на которую выведены числовые параметры – редактируемые поля (*Edit boxes*) и наиболее часто употребляемые команды из меню – кнопки (*Button*).

Окна графиков

На экран могут быть выведены 1, 2 или 3 окна графиков с общей осью *X*. Максимальное число графиков в каждом окне равно 9. Под окнами графиков выводится панель номеров графиков, цвет номера соответствует цвету соответствующего графика. Если график не выводится на экран (скрыт), номер выводится серым цветом на черном фоне. Одиночный щелчок левой кнопкой мыши на номере делает этот номер графика выбранным (отмечается красной рамкой вокруг номера). Двойной щелчок левой кнопкой мыши на номере оставляет на экране только этот график, остальные временно скрыты. Щелчок правой кнопкой мыши на номере выведенного графика скрывает его, а на номере скрытого графика вновь выводит его на экран. Остальные операции с графиками проводятся с помощью панели управления (группа *Edit*) и меню (описание см. ниже). Графики могут быть получены как в результате измерения, так и в результате расчета по заданной модели образца. Источник получения выбранного графика отображается справа от панели номеров (*Measured or simulated*). Еще правее выводится имя файла, в котором сохранен выбранный график. Если график еще не сохранен, имя не выводится. После чтения данных появившееся имя файла можно использовать как имя образца при последующих измерениях, для этого нажать кнопку *Use as sample name*. Изменить масштаб окна графиков можно с помощью левой кнопки мыши. Для этого, удерживая левую кнопку мыши, отметить прямоугольник в любом окне графиков так, чтобы он не вышел за пределы окна. После отпускания кнопки масштаб окна будет соответствовать прямоугольнику. Другие окна графиков изменяют масштаб только по оси *X*. Для возврата к стандартному масштабу графиков нужно нажать кнопку *Auto scale* на панели управления.

Элементы панели управления

1. Кнопка *View Model* выводит или убирает окно модели образца (см. пункт «Окно модели образца»).
2. Редактируемое поле с названием «*N* ⇒» определяет число слоев модели. При выведенном окне модели для изменения числа слоев необходимо после ввода числового значения нажать *Enter* на клавиатуре.
3. Кнопка *View Setup* выводит или убирает окно установочных параметров.
4. Группа кнопок *File*:
 - кнопка *Read* – чтение данных. При нажатии открывается окно со списком файлов из выбранной директории;

- кнопка *Save screen* – запись видимых на графиках данных в выбранную директорию;
- кнопка *Save all* – запись всех данных в выбранную директорию. При нажатии *Save screen* и *Save all* появляется модальное окно с указанием имени файла, состоящего из выбранного заранее имени образца и порядкового номера в качестве расширения. Редактируемое поле позволяет ввести или отредактировать комментарий к файлу данных.
- 5. Редактируемое поле с названием *Sample Name* служит для ввода имени образца для формирования имени файлов данных. Максимальное число символов в имени равно 26.
- 6. Кнопка *Data Path* вызывает окно со списком директорий данных для выбора директории или создания новой директории.
- 7. Группа кнопок *Edit*:
 - кнопка *Delete one* – удаляет выбранный график из памяти;
 - кнопка *Delete all* – удаляет все графики из памяти;
 - кнопка *Output all* – выводит на экран все скрытые графики;
 - кнопка *Manual Scale* – устанавливает масштаб вывода графиков вручную;
 - кнопка *Set Auto Scale* – восстанавливает автоматический масштаб графиков.
- 8. Группа *Acquisition*:
 - поле выбора (*Combo box*) с названием «*X axis*» позволяет выбрать аргумент по оси *X* для последующих измерений (длина волны или время). При изменении этого параметра все предыдущие графики после начала измерения будут уничтожены;
 - флажок (*Check box*) «*Compensator*» определяет наличие компенсатора при измерении. Состояние *Check box* должно соответствовать положению компенсатора, который устанавливается вручную (галочка соответствует введенному в луч компенсатору);
 - редактируемое поле с названием «*Period [s]*» устанавливает время для измерения одной точки спектра или период при измерении на одной длине волны в зависимости от времени (*vs time*). Рекомендуемое время для измерения спектра – 0,2–4 с. При установке значения 0 время измерения на каждой длине волны выбирается автоматически в диапазоне 0,2–4 с, исходя из интенсивности лучей;
 - редактируемое поле с названием «*Total time*» (только для измерения *vs time*) устанавливает конечное время измерений. Для нулевого значения этого параметра измерения идут неограниченно, но при достижении 400 точек число измеренных точек уменьшается в 2 раза за счет объединения двух соседних точек в одну с последующим увеличением периода измерения в 2 раза;
 - редактируемое поле *Init. Wave* устанавливает начальную длину волны для измерения спектра в [nm];

- редактируемое поле *Fin. Wave* устанавливает конечную длину волны для измерения спектра в [nm];
- редактируемое поле *Step* [nm] устанавливает шаг длины волны для измерения спектра;
- редактируемое поле *Steps* выводит число шагов шагового двигателя монохроматора относительно метки в монохроматоре, для которой число шагов принимается за 0. В случае если при совмещении меток это число отличается от 0, его необходимо установить равным 0;
- кнопка *Initialize limb* устанавливает шаговым двигателем начальное положение так, чтобы число шагов *Steps* = 0. При этом необходимо проверить совмещение меток на приводе монохроматора от шагового двигателя. В случае несовмещения установить его вручную. Эту процедуру нужно проделывать при запуске программы и при подозрении на сбой во вращении шагового двигателя;
- кнопка *Set Wave* с соответствующим редактируемым полем служит для установки длины волны на монохроматоре;
- кнопка *Change Init-Fin* меняет местами значения *Init. Wave* и *Fin. Wave*;
- кнопка *Start* начинает процесс измерения.

9. Группа *Display*:

- поле выбора *Num of gr.* позволяет выбрать число окон графиков на экране. Для значения *Nom.* на экран выводится одно окно с номограммой. Величины по осям могут быть, например, tg, cos, значение угла устанавливается окном *Value*. Для числа окон 2 или 3 по оси *X* (общая для всех окон) выводится длина волны или время, по осям *Y* выводятся выбранные величины (см. следующий пункт). Для числа окон 3 в третьем окне выводится величина R_s (коэффициент отражения *s*-поляризации);

- поле выбора *Value* позволяет выбрать величины для вывода на экран.

10. Группа *Analysis* предназначена для вывода расчетных графиков и расчета параметров модели по измеренным данным:

- редактируемые поля *Min. Wave*, *Max. Wave* позволяют выбрать диапазон длин волн [nm], в котором выводятся расчетные графики;
- кнопка *Calc. Spectr.* выводит на экран окно для расчета неизвестных параметров модели по измеренным спектрам. Перед нажатием кнопки в модели должны быть выбраны параметры для расчета. В окне для расчета необходимо ввести номера графиков, по которым рассчитываются параметры. Программа поддерживает режим одновременного обсчета нескольких пар измеренных спектров эллипсометрических углов (не более 4). Этот режим применяется для обсчета измерений одного и того же образца при различных углах падения. В этом случае несколько номеров графиков вводится в виде строки цифр без пробелов. В процессе расчета (минимизация суммы квадратов отклонений измеренных и расчетных точек) выводятся текущие расчетные величины и среднее отклонение

(*deviation*). Минимизация отклонений проводится в указанном диапазоне длин волн;

- кнопка *Calc. Points* выводит на экран окно для расчета неизвестных параметров модели по каждой точке или нескольким точкам выбранного графика. В окне для расчета необходимо ввести номера графиков, по которым рассчитываются параметры (как в предыдущем пункте). Также ввести шаг расчета в точках (несколько точек могут быть объединены в одну расчетную точку). В процессе расчета для каждой длины волны выводятся точки на графиках и выводятся текущие расчетные величины и среднее отклонение (*deviation*). После окончания расчета, полученные спектры расчетных величин можно сохранить в указанную заранее для этого директорию под указанным заранее именем;
 - кнопка *Simulation (add)* выводит на экран расчетные графики согласно заданной модели образца. Графики добавляются к предыдущим;
 - кнопка *Simulation (change)* работает аналогично, но выводимый график заменяет собой предыдущий;
 - кнопка *Digital output* – выводит окно для числового представления точек выбранного графика;
 - мода *Meas. points* позволяет увидеть численные значения параметров выбранной экспериментальной или расчетной точки выбранного графика;
 - мода *All points* позволяет увидеть численные значения параметров любой точки выбранного графика, в частности, расположенной между экспериментально полученными или расчетными точками;
 - мода *Correction* позволяет исправить значения параметров выбранной точки выбранного графика;
 - кнопка *Combine* позволяет объединить два спектра (графика), снятые в разных диапазонах. Номера графиков вводятся в два расположенных рядом окна (редактируемые поля).
11. Кнопка *Exit* используется для выхода из программы. При этом все графики сохраняются и воспроизводятся при последующем запуске.

Команды меню

В данном пункте приводится описание только тех команд, которые не отображены на панели управления.

1. Группа *File*:

- *Export ASCII one* – выводит в текстовые файлы все точки выбранного графика для дальнейшего построения графиков в программе типа *Origin* или *Excel*. Для каждого окна графиков создается свой файл. Имена файлов образуются путем добавления к введенному по запросу имени символов «_1.dat» и «_2.dat»;

- *Export ASCII all* – выводит в текстовые файлы точки всех видимых графиков для дальнейшего построения графиков в программе типа *Origin* или *Excel*;
 - *Save to library* – выводит в текстовый файл для библиотеки все точки выбранного графика для n, k ;
 - *Library* – выводит окно для работы с библиотекой данных $n, k(L)$ (см. пункт «Ввод параметров из библиотеки»).
2. Группа *Edit*:
- *Digital output* – выводит окно для числового представления точек выбранного графика.
3. Группа *Acquisition*: все команды выведены на панель управления (см. выше).
4. Группа *Analysis*:
- *Make difference* – все точки спектра на всех графиках заменяются отклонением от среднего значения на каждой длине волны. Применяется для оценки воспроизводимости измеренных спектров. Для использования этой кнопки необходимо, чтобы все кривые в окнах графиков были измерены в одном и том же диапазоне длин волн с одним и тем же шагом. Следует помнить, что перед выполнением этой команды целесообразно записать файл в память – после ее выполнения возвращение к исходным кривым невозможно;
 - *Calc. Deviation* – расчет среднеквадратичного отклонения всех точек выбранного графика. Результат выводится в строку сообщений. Эта команда имеет смысл только для измеренных величин на одной длине волны vs time.
5. Группа *Options*:
- *Points (meas.)* – определяет, выводятся ли точки на графиках, полученных в результате измерения;
 - *Points (sim.)* – определяет, выводятся ли точки на графиках, полученных в результате расчета;
 - *Lines (meas.)* – определяет, соединяются ли точки линиями на графиках, полученных в результате измерения;
 - *Lines (sim.)* – определяет, соединяются ли точки линией на графиках, полученных в результате расчета.
6. Группа *Calibrations*:
- *Ratio and transmission* – калибровка отношения чувствительностей каналов ($h_a(L)$) для двух поляризаций после анализатора, величины $P - A$ и спектра интенсивности. Калибровка проводится на просвет, без образца;
 - *Polarizer angle* – калибровка угла поляризатора по отношению к плоскости падения при известной величине $P - A$. Калибровка проводится с образцом Si/SiO₂ с толщиной слоя окисла 2–30 nm;

- *P, A in situ* – установка углов анализатора и поляризатора по отношению к плоскости падения. Установка проводится с образцом Si/SiO₂ с толщиной слоя окисла 2–8 nm;
 - *Compensator (tan psi, Delta)* – калибровка спектра параметров компенсатора;
 - *Wave Length* – калибровка монохроматора по длинам волн;
 - *Minimal R1, R2* – проверка точности скрещения по всему спектру анализатора и поляризатора при нулевом азимуте;
 - *Set motor phase* – установка соответствия положения шагового двигателя в поляризаторе для переключения лучей номерам лучей, записанным в окне *Setup*. Установка выполняется при первом включении, либо после аварийного выхода из программы, либо после юстировки при ручной прокрутке двигателей;
 - *Test* – выводит окно для тестирования (проверки работы) электронных схем. Тестирование проводится изготовителем.
7. Группа *Quit*:
- *Exit (save data)* – выход из программы с сохранением существующих графиков для последующего воспроизведения при следующем запуске программы;
 - *Exit (no save)* – выход из программы без сохранения графиков. При последующем запуске программы воспроизводятся графики, сохраненные при последнем выходе из программы по команде *Exit (save data)* или *Exit* на панели управления.

Окно модели образца

Окно модели выводится и убирается кнопкой *View Model*. Первые 2 параметра модели (углы анализатора и поляризатора) при запуске очередного измерения переустанавливаются из окна *View Setup*. Переустановить их также можно кнопкой *Setup A, P*. Кнопка *Setup F* устанавливает в модели текущий угол падения из окна *View Setup*. Угол падения не переустанавливается при запуске измерения. Кнопка 0 слева от параметров *A, P, F* переписывает текущие параметры модели в окно модели выбранного графика. Например, если вы забыли переустановить угол падения перед измерением, расчет параметров будет неверным. В этом случае переустановка параметров исправляет ситуацию. Ниже располагаются группы параметров подложки и слоев. В группе подложки – 2 параметра (n, k), а в группах слоев – 3 параметра (добавляется толщина слоя d). Всего может быть до 5 различных слоев.

Для многослойных периодических и квазипериодических структур при числе слоев > 1 порядок чередования слоев в образце можно задавать с помощью маски, выведенной внизу окна. Каждый слой можно включать в модель многократно. Номера чередующихся слоев вводятся в строку маски без пробела. Все-

го с помощью маски можно определить до 62 слоев. Параметры n, k можно вводить численно в редактируемые поля или загружать из библиотеки данных, используя как литературные данные по оптическим свойствам веществ, так и данные, определенные из собственных спектроэллипсометрических измерений.

Слева от каждой группы параметров имеется кнопка для переключения загрузки данных. В случае появления комментария *Not loaded* следует загрузить данные из библиотеки заново. Ввод параметров из библиотеки

При нажатии кнопки с номером слоя выводится окно со списком файлов библиотеки данных. При однократном нажатии левой клавиши мыши на файле выделяется этот файл. При двойном нажатии (или нажатии на кнопку *Add*) файл добавляется в список для перевода в модель. В списке может быть до 2-х файлов, для каждого файла имеется редактируемое поле. В первый вводится относительная концентрация вещества из 1-го файла (по умолчанию равна 1). При наличии 2-х веществ показатели преломления и поглощения вычисляются для их комбинации с учетом концентраций в соответствии с теорией «эффективной среды» [10]. В том случае если требуется задать смесь трех веществ (например, слой частично пористого материала, являющегося твердым раствором двух полупроводников), следует вначале создать и загрузить в библиотеку спектры твердых растворов различного состава, а затем «смешивать» их с воздухом (*void*).

При нажатии клавиши *View* спектры n, k из выделенного файла временно выводятся в виде графика. При нажатии *OK* данные выбранных файлов переводятся в модель. При этом в модели вместо редактируемых полей для данного слоя записываются имена файлов данных. Двойной щелчок мышью по этому полю также выводит на экран спектры n, k в виде графика.

Окно *Setup*

Окно выводится и убирается кнопкой *View Setup*. Содержит поле выбора для выбора угла падения и редактируемые поля с параметрами: *Incidence angle*, *Analyzer angle*, *Polarizer angle*, *Tan psi of compensator (550 nm)*, *Delta of compensator (550 nm)* (к этим значениям привязывается спектр параметров компенсатора), вес *cos delta* для расчетов с минимизацией суммы квадратов отклонений и длина волны, на которой программа останавливает измерение для смены фильтра. Поле выбора с надписью *Get Incidence Angle* содержит дискретный набор откалиброванных углов падения, один из которых необходимо выбрать после передвижения плеч поляризатора и анализатора. Кнопка *Set Incidence Angle* служит для переноса значения угла падения из редактируемого поля в текущую строку поля выбора для смены его после калибровки. Кнопка *Change beam P* служит для смены луча в поляризаторе (для этого производится 2 шага шаговым двигателем). Текущие номера лучей отображаются в соответствующем редактируемом поле. Кнопка *Step P* вызывает один шаг двигателя без изменения отображаемых номеров лучей. Она служит для ручной настройки положения двигателя и его соответствия номеру отображаемо-

го луча. Внешний луч на обтюраторе соответствует лучу № 1 (*p*-поляризация), внутренний – лучу № 2 (*s*-поляризация). Кнопка *Set Motor Phase* автоматически устанавливает соответствие лучей положению двигателя при наличии луча на фотоприемниках. (см. «Команды меню»).

Окно *Data Path*

Кнопка *Data Path* вызывает окно со списком директорий данных. Для выбора директории из списка нужно отметить директорию левой кнопкой мыши и нажать кнопку *OK*. Для ввода новой директории необходимо напечатать ее название со всеми путями в редактируемом поле и нажать кнопку *Add New*. Все пути к директории должны существовать, сама директория создается автоматически, если она не существует. Для выбора существующей директории, если ее нет в списке, нажать кнопку *Browse*, выбрать диск и в появившемся списке директорий диска выбрать нужную директорию двойным нажатием левой кнопки мыши. Если выбранная директория содержит поддиректории или не содержит файлов данных, она открывается с появлением списка поддиректорий. Если директория содержит данные, ее имя появляется в редактируемом поле. Для включения ее в список нажать кнопку *Add New*.

Проверка настройки эллипсометра

- установить угол падения равным 90° , отключить компенсатор, убрать микроприставку;
- установить зеленый луч (около 550 нм);
- проверить прохождение луча через центр над столиком с помощью цилиндрической вставки и через центр диафрагмы на выходе поляризатора;
- проверить вхождение лучей в центр входной диафрагмы анализатора;
- вставить в луч проверочное зеркало в анализаторе и убедиться, что луч попал в перекрестие на матовом стекле;
- ввести в луч компенсатор и проверить совпадение лучей с компенсатором и без компенсатора;
- установить плечи поляризатора и анализатора под углом 70° ;
- установить на столик плоско-параллельный (не изогнутый) образец;
- винтами наклона и высоты столика установить луч на матовом стекле анализатора в то же положение, как было на просвет, и совмещение линий в автоколлиматоре;
- проверить, чтобы центр цилиндрической вставки был на уровне поверхности образца;
- ввести в луч микроприставку и проверить, чтобы луч при этом не смещался.

Если не выполняются вышеуказанные требования, нужно обратиться к изготовителю за советом или вызвать представителей для настройки.

Калибровка эллипсометра

Параметры, которые подлежат калибровке:

- спектр отношения чувствительностей каналов, соответствующих двум поляризациям после анализатора;
- углы поляризатора и анализатора по отношению к плоскости падения;
- угол падения;
- спектры $tg \Psi$, $\cos \Delta$ компенсатора.

Полная калибровка осуществляется изготовителем. Пользователь при необходимости может провести следующие калибровки.

Калибровка спектра отношения чувствительностей каналов в анализаторе:

- установить угол падения равным 90° (на просвет), отключить компенсатор, микроприставку.
- в группе *Acquisition* выбрать максимальный диапазон длин волн, который будет использоваться в будущих измерениях (например, 380–1050 нм). Шаг по длине волны желательно выбрать 10 нм. Время измерения установить 4 с.
- в меню *Calibration* нужно выбрать пункт *Ratio and transmission* и следовать инструкциям программы.

Спектр отношения чувствительностей каналов $h_a(L)$, соответствующих двум поляризациям после анализатора, в основном определяется отношением коэффициентов прохождения двух поляризаций в делительной призме и отношением чувствительности фотодиодов. Он выводится на 1-м графике. На 2-м графике выводится разность между углами поляризатора и анализатора $P - A$, она не должна зависеть от длины волны. Если она меняется по спектру более чем на $0,1^\circ$, необходимо проверить настройку луча (луч может задевать какие-то элементы). При правильно отъюстированном эллипсометре измеренная величина $P - A$ меняется по спектру не более, чем на $0,05^\circ$. На 3-м графике выводится интенсивность источника света. После калибровки значение угла поляризатора P не меняется, а значение угла анализатора A корректируется в соответствии с полученной разностью $P - A$. Эта разность получается как среднее по спектру в среднем участке длин волн (края спектра игнорируются).

Калибровка угла поляризатора по отношению к плоскости падения при известной разнице $P - A$

- установить плечи поляризатора и анализатора под углом 70° .
- установить образец Si/SiO₂ с точно известной толщиной окисла в диапазоне 2–30 нм и убрать компенсатор. Отъюстировать наклоны столика по автоколлиматору, а высоту – по попаданию луча в нужное место матового стекла в анализаторе.
- углы поляризатора и анализатора должны оставаться такими, как были при калибровке отношения чувствительностей каналов $h_a(L)$.

- установить пределы измерения спектра примерно 400–700 нм с шагом 20 нм. Время измерения установить 0 с.
- установить величину для вывода на экран $\tan \psi$, $\cos \Delta$.
- в модели образца установить один слой. Для подложки и слоя установить библиотечные данные кремния и окисла кремния соответственно. Установить толщину слоя и убрать галочку напротив этой величины. Если установить галочку напротив угла падения, он также будет вычислен, как и значение азимута поляризатора.
- в меню *Calibration* выбрать *Polarizerangle*. После подтверждения калибровки выводится окно для измерений спектра и измеряется спектр отношений R_1, R_2 . После измерения проводится расчет угла поляризатора и заданных параметров. Данные представлены в отдельном окне. В окне графиков появляются измеренный и расчетный графики спектра $\tan \Psi$, $\cos \Delta$. Если они хорошо совпадают и расчетные данные разумны, подтвердить результаты калибровки.

Спектральное исследование

После установки образца и угла падения отъюстировать наклоны столика по автоколлиматору, а высоту – по попаданию луча в нужное место матового стекла в анализаторе.

При измерениях и калибровках необходимо избегать попадания внешнего света на входное отверстие анализатора. Хотя небольшая постоянная засветка не влияет на измерения, но изменяющаяся во времени засветка приводит к большим дополнительным шумам. Изменение засветки происходит при передвижениях людей около эллипсометра или при изменении солнечного света, проходящего через окна. Желательно закрывать сверху пространство между поляризатором и анализатором черным экраном (можно из черной бумаги).

Порядок измерения:

- в группе *Acquisition* выставить *wave* (в поле выбора с названием «*X axis*»);
- параметр *period* (время измерения спектра) выставить 0 или в диапазоне 0,2–4 с в зависимости от образца и требуемой точности;
- в окне *Setup* выбрать угол падения так, чтобы он соответствовал установленному;
- в модели образца нажать *Setup F* для вызова соответствующего калиброванного угла падения либо установить в редактируемом поле нужное значение без выбора в окне *Setup*. Значения углов A, P устанавливаются из окна *Setup* автоматически;
- если измерения проводятся с компенсатором, необходимо ввести приблизительную модель образца, иначе расчет Δ -образца может быть неправильным (см. пункт «Использование компенсатора»);

- измерение начать кнопкой *Start*. Программа останавливает измерения на длине волны, указанной в *Setup* для смены фильтра. Фильтр используется для отрезания второй гармоники в спектре, которая присутствует в отраженном свете от дифракционной решетки в инфракрасной части. Название требуемого фильтра указывается в окне измерений. Для продолжения измерений после смены фильтра нажать *Continue* (или пробел на клавиатуре). В процессе измерения можно изменить параметры: время измерения, шаг и конечную длину волны. Для этого нужно нажать *Stop*, ввести параметры и нажать *Continue*. Для досрочного окончания измерения нажать *End*. При очень малой интенсивности или большом фоне измерение точки может не состояться или получатся неправильные данные (например, $|\cos \Delta > 1|$). В этом случае измерения останавливаются, и выводится окно для выбора. При выборе *Retry* измерение повторяется. Если при повторных измерениях не удастся измерить на данной длине волны, нажать *Ignore*. При этом измерения продолжатся на следующей длине волны. При нажатии *Abort* измерения заканчиваются. Для измерений при калибровке или при измерении первой точки в случае измерительной ошибки выводится окно с двумя возможностями выбора: *Retry*, *Cancel*. При нажатии *Cancel* калибровка (или измерения) отменяется.

Обработка результатов измерений и построение эллипсометрических моделей

Программа обеспечивает возможность расчета параметров d, n, k в модели образца по измеренным данным (R_1, R_2 или $tg \Psi, \cos \Delta$ или Ψ, Δ). Имеется 2 вида расчетов: по всему измеренному спектру экспериментальных данных (окно *Calc. spectrum*) и независимо для каждой точки или участка измеренного спектра (окно *Calc. points*). Необходимо учитывать, что при малой толщине слоя (менее 20 нм) точность расчета n, k резко ухудшается с уменьшением толщины.

Расчеты параметров по всему спектру

В случае расчета по спектру (*Calc. spectrum*) предполагается, что дисперсия данного материала является нормальной. При этом дисперсия для n аппроксимируется упрощенной формулой Зельмейера:

$$n(\lambda)^2 = n_0^2 + \frac{1}{\left(1 - \frac{\lambda_0^2}{\lambda^2}\right)}, \quad (2.5)$$

где: n_0 – значение показателя преломления на бесконечной длине волны; λ_0 – длина волны, на которой n равно бесконечности; дисперсия для k аппроксимируется экспоненциальной зависимостью:

$$k(\lambda) = k_m \exp\left(\frac{(\lambda_m - \lambda)}{\lambda_1}\right), \quad (2.6)$$

где: k_m – значение показателя поглощения k на длине волны $\lambda_m = 550$ нм, λ_1 – интервал длины волны, на котором k меняется в e раз.

При расчете в данном режиме в модели образца в позициях n и k отображаются параметры, характеризующие спектральные зависимости, описываемые формулами (2.5) и (2.6). Вместо не имеющего физического смысла параметра n_0 в редактируемое окно вводится параметр n_m , соответствующий значению показателя преломления на длине волны $\lambda_m = 550$ нм:

$$n_m^2 = n_0^2 + \frac{1}{\left(1 - \frac{\lambda_0^2}{\lambda_m^2}\right)},$$

где: $n = n_m$ – основной параметр модели. Вспомогательный параметр модели $L_0 = \lambda_0$. Для k в соответствующие окна вводятся параметры k_m (основной параметр модели $k = k_m$) и λ_1 (вспомогательный параметр модели $L_1 = \lambda_1$). Слева от каждого параметра имеется окно-флажок для отметки того, что параметр подлежит расчету. Для толщины слоя имеется дополнительный параметр d_d , вводящий поправку на неоднородность толщины образца. Этот параметр может быть ненулевым только для одного из слоев модели.

Параметры образца можно рассчитывать по одному измеренному спектру и по нескольким спектрам, если они измерены для одного образца при разных углах падения.

Для расчета необходимо:

В модели образца ввести точные значения параметров, не подлежащих расчету, или ввести библиотечные данные для них. Для расчетных параметров ввести их нулевое приближение и отметить их галочкой как искомые. Значения параметров n, k относятся к длине волны 550 нм. Вспомогательные параметры L_0, L_1 (см. формулу выше) также могут быть отмечены как искомые, если введены ненулевые значения и соответствующий основной параметр отмечен как искомый. Параметр d_d моделирует неоднородность толщины слоя (сглаживаются острые пики в спектре). Этот параметр может быть ненулевым только для одного из слоев модели. При нулевых параметрах d_d для всех слоев при расчете учитывается спектральная ширина луча.

Нажать Simulation add. Если расчетный график для введенной модели сильно не совпадает с измеренным, повторить пункт 1 (ввести другие параметры).

Нажать Calc. spectrum. В появившемся окне ввести номер измеренного графика, по которому проводится расчет, или строку из нескольких номеров без пробелов, если проводится расчет для измеренных спектров при разных углах падения.

Нажать ОК для начала расчета. Во время расчета выводятся расчетные данные и отклонение расчетного спектра от измеренного (deviation). Если расчетные данные не меняются, можно досрочно закончить расчет, нажав ОК.

После окончания расчета нажать ОК для вывода расчетного графика и установки полученных данных в модели образца. Cancel отменяет расчет.

Для просмотра спектров $n(L), k(L)$ (по формуле Зельмейера) два раза щелкнуть левой кнопкой мыши по свободному месту нужного слоя в модели образца. Открывается окно для записи полученного спектра либо в указанную директорию данных, либо в библиотечный файл.

Также существуют временное исследование, с использованием компенсатора и с использованием микроприставки.

Расчеты параметров для каждой точки спектра

При расчете параметров следует иметь в виду, что решение обратной задачи для одной точки спектра может быть неоднозначным. Поэтому иногда бывает необходимо устанавливать нулевое приближение параметров достаточно точно. При больших толщинах слоев в особых точках спектра (например, в области пиков $\text{tg}\Psi$ или $\cos \Delta$) из-за неоднозначности решение может перейти на другую ветвь, математически удовлетворяющую измеренные данные, но физически неправильную. При расчете n, k для малых толщин слоя (< 10 нм) решение может быть очень неточным или невозможным.

Для расчета необходимо:

В модели образца ввести точные значения параметров, не подлежащих расчету, или ввести библиотечные данные для них. Для расчетных параметров ввести их нулевое приближение и отметить их галочкой как искомые. Можно ввести не более двух искомых параметров для расчета по одному спектру и не более трех параметров для расчета при измерении при нескольких углах падения.

Нажать Simulation add. Если первая расчетная точка графика для введенной модели сильно не совпадает с измеренной, повторить пункт 1 (ввести другие параметры).

Нажать Calculation points. В появившемся окне ввести номер измеренного графика, по которому проводится расчет, или строку из нескольких номеров без пробелов, если проводится расчет для измеренных спектров при разных углах падения.

В поле выбора выбрать направление расчета (начало с минимальной или максимальной длины волны).

В редактируемом поле с названием Step, points ввести число точек, по которым усредняются измерения и выводятся в виде одной точки.

Нажать ОК для начала расчета. Во время расчета выводятся расчетные данные и отклонение расчетного спектра от измеренного (deviation), а также точки на график. Если расчет точки затянулся и расчетные величины не меняются, нажать ОК для окончания расчета точки и перехода к следующей.

7. После окончания расчета нажать ОК для записи расчетного графика в файл в указанную директорию. Cancel отменяет расчет.

Формирование библиотечных файлов из результатов расчета n, k

1. Для записи n, k , полученных из расчета по всему спектру:
 - выбрать график спектра, полученный в результате расчета;
 - щелкнуть два раза левой кнопкой мыши по свободному месту в области нужного слоя в окне модели. На графике появятся расчетные спектры n, k и появится окно для записи данных;
 - в группе *Save as Library* ввести имя файла и комментарий, начинающийся с буквенного символа (не с цифрового). Нажать кнопку *Save*.
2. Для записи n, k , полученных из расчета каждой точки спектра:
 - после получения расчетных спектров нажать *OK* в окне расчета и записать расчетные данные n, k в предварительно указанную директорию;
 - после записи измеренных спектров (если это необходимо) прочитать данные n, k , нажав кнопку *Read* и заменив старые данные;
 - в меню *File* выбрать *Save to Library* и записать файл в библиотеку, введя имя файла и комментарий.

Порядок оформления отчета по лабораторной работе

Отчет оформляется в виде журнала лабораторных работ и должен содержать:

1. Краткую теоретическую часть.
2. Схематическое изображение или фотографию двухканальном эллипсомере «Эльф» с указанием его основных частей.
3. Фотографии или эскизы исследуемых образцов.
4. Обработку результатов исследований.
5. Построенную эллипсометрическую модель
6. Выводы.

Контрольные вопросы

1. Физические основы эллипсометрии?
2. Назначение эллипсометра?
3. Технические характеристики и устройство эллипсометра?
4. Принцип работы эллипсометра?
5. Каким образом производится определение толщины полупрозрачной или прозрачной структуры?
6. Виды исследований на эллипсометре?
7. Принцип расчета параметров по всему спектру?
8. Упрощенная формула Зельмейера, вывод формулы?