

Эллипсометр VASE (Variable Angle Spectroscopic Ellipsometer) производства фирмы J.A. Woollam Co., Inc. (США)

В конце 19 века немецкий физик Пауль Друде использовал изменение поляризации светового пучка, отраженного от поверхности образца, для определения оптических свойств материалов и измерения толщины слоев в диапазоне порядка нм. Возникновение эллиптической поляризации после отражения линейно поляризованного падающего на образец пучка дало название новому методу, зародившемуся в этих первых экспериментах.

Принцип эллипсометрии основывается на том факте, что световые пучки с поляризацией (ориентацией вектора электрического поля) в плоскости падения E_p и перпендикулярно к ней E_s отражаются от поверхности образца с различной интенсивностью. Поэтому, в общем случае, отраженный образцом световой пучок имеет эллиптическую поляризацию. Эллиптически поляризованный свет может быть описан так называемыми эллипсометрическими углами «Пси» Ψ и «Дельта» Δ , которые определяются комплексными коэффициентами отражения Френеля r_p и r_s :

$$\frac{r_p}{r_s} = \frac{\tan \Psi_p}{\tan \Psi_s} \exp[i(\Delta_p - \Delta_s)] \equiv \tan \Psi \exp(i\Delta).$$

В этом уравнении Δ соответствует фазовому сдвигу электрических полей в направлениях в плоскости падения светового пучка и перпендикулярно к ней, а $\tan \Psi$ характеризует соответствующее изменение амплитудных соотношений.

Спектральный эллипсометр Woollam VASE (рис. 1) является универсальным прибором для исследования всех типов материалов: полупроводников, диэлектриков, полимеров, металлов, сверхпроводников, многослойных пленок, метаматериалов и т.д. Он сочетает высокую точность с широким спектральным диапазоном от 193 до 2500 нм. Возможность изменения длины волны и угла падения обеспечивает гибкость инструмента в различных применениях. Прибор измеряет изменение состояния поляризации света, отраженного от поверхности образца или прошедшего через образец. Эта информация связана с толщиной исследуемого образца и его оптическими свойствами. Для выполнения этой задачи прибор должен

- Создавать световой пучок с заданными длиной волны и состоянием поляризации, направленный на поверхность образца;
- Измерять состояние поляризации светового пучка, отраженного от поверхности образца;
- Рассчитывать изменение состояния поляризации светового пучка, приведенное образцом.
- Широкополосный пучок света создается дуговой ксеноновой лампой высокого давления. Для выбора длины волны падающего пучка используется двойной монохроматор, построенный по схеме Черни-Турнера, с фокусным расстоянием 160 мм и эффективной апертурой $f/4.5$. Излучение выбранной длины волны по оптическому волокну передается из монохроматора во входной узел, где коллимируется и приобретает нужную поляризацию. Для создания дополнительных состояний поляризации наряду с поляризатором во входном узле используется АвтоРетардер™. Входной узел покидает коллимированный,

модулированный, поляризованный, монохроматический пучок света, который падает на вертикальный предметный столик с установленным на нем образцом. Предметный столик установлен на гониометрической платформе, которая позволяет с высокой точностью контролировать угловые положения входного узла и узла детекторов относительно предметного столика. Пройдя через ирисовую диафрагму узла детекторов, отраженный образцом световой пучок модулируется вращающимся поляризатором (анализатором) и попадает на единый приемник, состоящий из двух последовательно расположенных детекторов Si и AlGaAs (на разные диапазоны длин волн). Аналоговый сигнал детектора преобразуется в цифровой платой цифро-аналогового преобразователя, вставляемой в системный блок компьютера.



Рис. 1. Общий вид спектрального эллипсометра Woollam VASE.

Управление всеми описанными основными узлами спектрального эллипсометра Woollam VASE осуществляется с помощью программного пакета WVASE32™. Этот же пакет используется для обработки полученных экспериментальных данных и модельных расчетов физических параметров и толщины слоев из вызванного образцом изменения поляризации падающего пучка.

Совершенно естественно, что точность измерений изменения поляризации и, соответственно, достоверность определения физических параметров и толщины слоев напрямую связана с точностью настройки и калибровки описанной оптической системы. Для решения проблемы юстировки и калибровки системы используется уникальный

четырёхквadrантный детектор (Si фотодиод), который вставляется в гнездо входного узла, при этом предметный столик с образцом разворачивается так, чтобы обеспечить нормальное падение светового пучка на образец. Поляризованный пучок света проходит через отверстие диаметром 1.27 мм в четырёхквadrантном детекторе, падает по нормали на поверхность образца и отражается на четырёхквadrантный детектор. При идеальной настройке системы сигналы от всех четырёх квадрантов детектора оказываются равными.



Рис. 2. Спектральный эллипсометр Woollam VASE с установленным на нем оптическим криостатом CRV-725V фирмы Janis.

Важным преимуществом вертикального расположения образца в спектральном эллипсометре Woollam VASE является простота сопряжения прибора с оптическим криостатом для низкотемпературных измерений. В приборе используется высоковакуумный криостат CRV-725V фирмы Janis, обеспечивающий регулировку температуры исследуемого образца и поддержание ее на заданном уровне в диапазоне 4.2-500K с точностью $\pm 0.1\text{K}$ (Рис. 2). Криостат обеспечивает базовый вакуум 10^{-8} - 10^{-9} Торр, который необходим для предотвращения намерзания на поверхности исследуемого образца тончайшей пленки льда при охлаждении, которая искажает результаты измерений. Криостат снабжен двумя окнами для эллипсометрических измерений под

углом 70° и двумя окнами по нормали к плоскости образца для юстировки образца и измерений пропускания.

Вертикальный держатель образцов и независимая настройка образца и детектора обеспечивают гибкость использования спектрального эллипсометра Woollam VASE в различных экспериментальных конфигурациях:

- Эллипсометрия отражения
- Эллипсометрия пропускания
- Интенсивность R/T
- Генерализованная эллипсометрия (анизотропность)
- Матрица Мюллера (для деполяризованных анизотропных образцов)
- Одновременное измерение эллипсометрии и рассеяния
- Степень дополяризации

Основные характеристики спектрального эллипсометра Woollam VASE приведены в таблице.

Спектральный диапазон	193-2500 нм
Спектральное разрешение	0.3 Å
Время измерения	0.1-3 с на одну длину волны
Точность полностью автоматизированной гониометрической платформы, обеспечивающей независимое перемещение образца и приемника	0.01°
Диапазон углов полностью автоматизированного гониометра	15° – 90° (отражение) 0° – 90° (пропускание)
Точность встроенного четырёхквadrантного детектора, обеспечивающего точную установку угла образца	до 0.001°
Точность измерения Ψ	45°±0.03°
Точность измерения Δ	0°±0.02°
Воспроизводимость для образца 30 нм SiO ₂ /Si	$\Psi = \pm 0.015^\circ$ $\Delta = \pm 0.08^\circ$
Минимальные размеры исследуемых образцов	до 2 мм
Диапазон регулировки температуры исследуемых образцов	4.2-500К
Точность установки температуры	±0.1К

В качестве примеров использования спектрального эллипсометра Woollam VASE на Рис. 3 представлены:

(а) Результаты измерения эллипсометрических параметров (ψ , Δ) для кремниевой подложки со слоем оксида кремния SiO₂ на поверхности при различных углах падения света. Для обработки экспериментальных данных использована двухслойная модель (см. вставку на рисунке). Оптические свойства материалов (показатель преломления и поглощения) взяты из базы данных программы WVASE32. Свободным параметром модели является толщина слоя оксида, которая подбирается таким образом, чтобы модельные (расчетные) значения эллипсометрических параметров соответствовали экспериментальным. Для данного образца получена толщина оксидной пленки 177.5 нм.

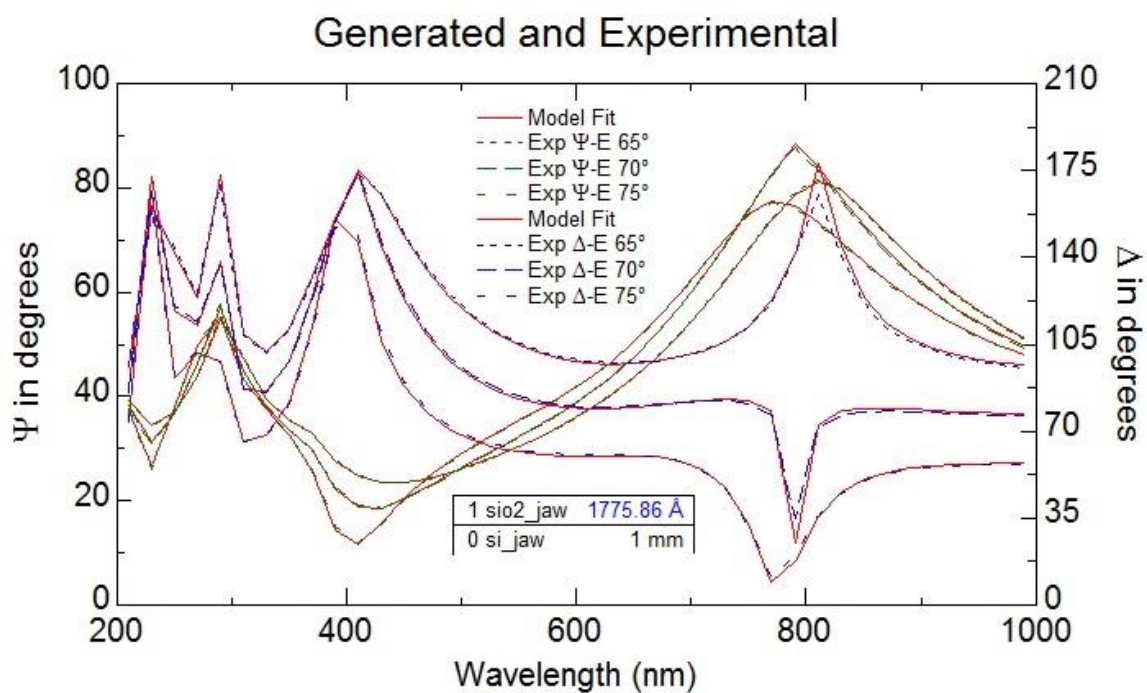


Рис. 3а. Результаты измерения эллипсометрических параметров (ψ , Δ) для кремниевой подложки со слоем оксида кремния SiO_2 на поверхности при различных углах падения света.

(б) Результаты измерения эллипсометрических параметров сверхпроводящего пниктида железа $\text{Ba}_{0.6}\text{K}_{0.4}\text{Fe}_2\text{As}_2$. На основании полученных данных программа WVASE32 позволяет рассчитать спектры показателя преломления и поглощения (n , k), которые, в свою очередь, могут быть использованы для расчета коэффициента отражения, используемого в дальнейшем для сопоставления результатов эллипсометрии и Фурье-спектроскопии (вставка на рисунке).

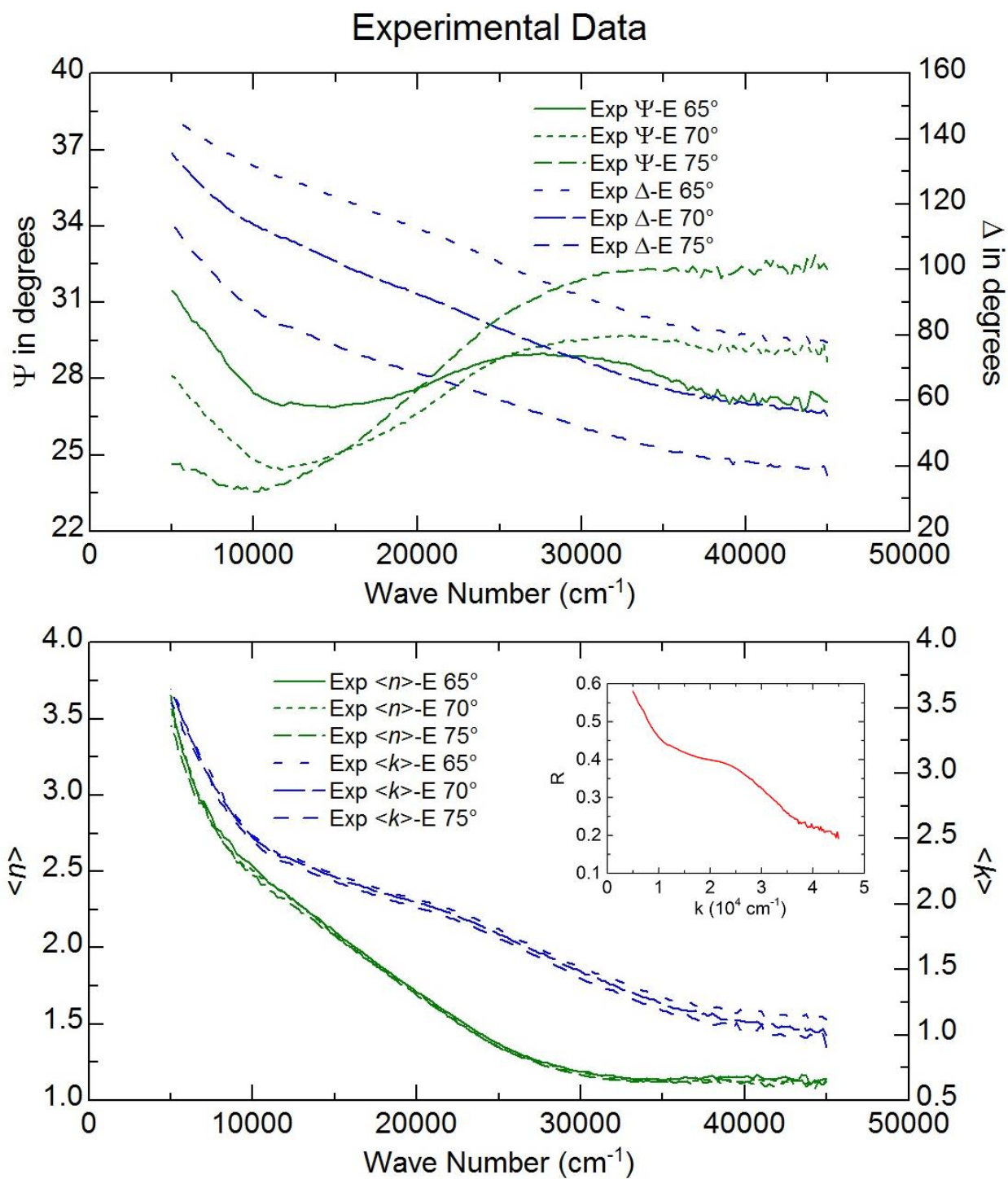


Рис. 36. Результаты измерения эллипсометрических параметров сверхпроводящего пниктида железа $\text{Ba}_{0.6}\text{K}_{0.4}\text{Fe}_2\text{As}_2$.