

## Эллипсометры – прецизионные средства контроля тонкоплёночных нанотехнологий

Рыхлицкий С. В., зав. лабораторией,  
Спесивцев Е. В., к.т.н., с.н.с.  
Швец В. А., д.ф.м.н., в.н.с.

Институт физики полупроводников им. А.В. Ржанова СО РАН  
<http://www.isp.nsc.ru>, г.Новосибирск, 630090, просп. ак. Лаврентьева, 13,  
тел: (383)330 89 46, e-mail: rhl@isp.nsc.ru

### Ellipsometers – precise control devices in thin film nanotechnology

S.V. Rykhliitsky, E.V. Spesivtsev, V.A. Shvets

Prospects of use of the ellipsometers in thin-film nanotechnologies and scientific experiments is discussed. Line of the modern ellipsometers, developed and produced in the Institute of Semiconductor Physics RAS at the moment is presented. Capability of ellipsometric equipment is illustrated by measurement results of a broad spectrum of different physical objects. Recommendations to increase the supply of ellipsometers on import substitution program are proposed.

*Keywords: ellipsometer, thin films, production and delivery.*

Рассматриваются перспективы использования эллипсометров в тонкопленочных нанотехнологиях и в научном эксперименте. Представлен ряд современных моделей эллипсометров, разработанных и выпускаемых в ИФП СО РАН в настоящее время. Возможности эллипсометрической аппаратуры иллюстрируются результатами измерений широкого класса различных физических объектов. Предложены рекомендации по оснащению научных организаций и предприятий современными эллипсометрами.

*Ключевые слова: эллипсометры, тонкие пленки, производство и поставка.*

Создание новых нанотехнологий неразрывно связано с развитием аналитических методов, обеспечивающих их прогресс. Для тонкопленочных нанотехнологий одним из таких методов является оптическая эллипсометрия, в основе которой лежит анализ состояния поляризации отражённого света [1]. В продолжение более чем вековой истории развития метода происходило постоянное совершенствование его аппаратной базы и методических приёмов, модельных представлений. В настоящее время эллипсометрия является общепринятым аналитическим средством контроля тонкопленочных слоистых наноструктур и исследования свойств чистой поверхности и широко применяется в науке и в промышленности [2]. Целью настоящей работы является представление основных достижений в области разработки унифицированного модельного ряда эллипсометров, созданных в ИФП СО РАН за последнее десятилетие.

В институте были разработаны и запатентованы ряд оригинальных статических фотометрических измерительных схем эллипсометров, которые были положены в основу всей линейки производимой в настоящее время в ИФП СО РАН эллипсометрической аппаратуры последнего поколения. Принцип работы этих схем заключается в регистрации четырёх постоянных сигналов, непрерывно считываемых с фотоприёмников в процессе измерения при фиксированных положениях поляризационных элементов и в отсутствии модуляции сигнала. Другая принципиальная особенность этих схем заключается в том, что в них используется деление светового пучка на входе анализатора не по амплитуде, а по фронту, что позволяет избежать ошибок измерения, вносимых светоделительными пластинками.

Суть решаемой проблемы состоит в том, что предложенные схемы, по существу, открывают новые возможности создания инструментария полной эллипсометрии для анализа материалов, характеризующихся анизотропной внутренней и поверхностной структурой, исследования напряжённых слоёв, атомарно чистых поверхностей наноматериалов, гетерогенных материалов с кластерной структурой, т.е. для изучения физических свойств всех материалов, где необходимо измерение не только эллипсометрических углов, но всех параметров вектора Стокса и элементов матрицы Мюллера–Джонса. Такой подход к анализу отражённого света называется «методом полной эллипсометрии» и даёт исчерпывающую информацию об оптических свойствах анизотропной и диффузно-рассеивающей поверхности. В отличие от классической фотометрической схемы статическая оказывается нечувствительна к колебаниям интенсивности источника света. Благодаря отсутствию вращения элементов в процессе измерения и модуляции сигнала, удалось получить высокое быстродействие измерительного тракта и высокое отношение сигнала к уровню шума. При этом схемы позволяют работать при слабой интенсивности зондирующего пучка. Перечисленные особенности открывают широкие возможности применения статических схем в эллипсометрах самого различного функционального назначения [3].

Рассмотрим кратко модельную линейку эллипсометров ИФП СО РАН:

*Быстродействующий одноволновой эллипсометр ЛЭФ–777.* Это самый простой по своим функциональным возможностям прибор. В качестве источника света в эллипсометре используется либо стабилизированный HeNe лазер (для микроизмерений), либо полупроводниковый лазер (для рутинных измерений).

Лазеры дают узконаправленное монохроматическое излучение большой мощности, что обеспечивает высокую точность и быстрдействие проведения измерений. Минимальное время измерения - 40 микросекунд, а оптимальное, при котором достигается чувствительность измерений поляризационных углов на уровне  $0,003^\circ$ , составляет 1 мс.

Такие характеристики позволяют исследовать быстропротекающие процессы адсорбции/десорбции, роста/травления слоев, высокотемпературных нагревов и другие. Для этих целей модифицированная версия лазерного эллипсометра может быть установлена на технологические или исследовательские вакуумные камеры для проведения *in situ* измерений. Лазерные эллипсометры используются не только в научных исследованиях, но и в высокотехнологичном производстве в качестве инструмента контроля, в том числе локальных объектов с высоким пространственным разрешением. Как правило, такие приборы, встроенные в технологические линейки на различных промпредприятиях, служат индикаторами, сигнализирующими об отклонении технологического процесса, что позволяет отбраковывать некондиционную продукцию.

*Спектральный эллипсометр «ЭЛЛИПС-1991».* Это прибор более высоких функциональных возможностей по сравнению с лазерным эллипсометром. Спектральные эллипсометры позволяют проводить измерения в оптическом диапазоне от ближнего УФ до ближнего ИК излучения. Основная область применения таких приборов – научные исследования: измерение спектров оптических постоянных и спектральных характеристик различных материалов, анализ сложных слоистых наноструктур, характеристика сверхчистой поверхности и др.

Эллипсометр позволяет проводить измерения в спектральном диапазоне от 250 до 1000 нм всего за несколько секунд. Для этой цели был разработан специальный быстродействующий монохроматор, имеющий спектральное разрешение 2 нм и обеспечивающий развертку спектра в указанном диапазоне за 2 секунды. Разработан также вариант встраиваемого спектроэллипсометра для высокоинформативного мониторинга быстропротекающих процессов непосредственно в технологических установках. Спектральные эллипсометры, являющиеся наиболее функциональными и универсальными приборами. Их доля в общем количестве производимых эллипсометров намного превосходит другие типы эллипсометрической аппаратуры.

*Эллипсометры высокого пространственного разрешения.* Данный класс приборов предназначен для проведения эллипсометрических измерений микрообъектов и различного типа поверхностных структур с высокой степенью локализации элементов. Эллипсометры высокого пространственного разрешения разделяются на сканирующие и отображающие.

Сканирующий эллипсометр «МИКРОСКАН-3М», снабжен микрооптикой для фокусировки лазерного пучка в пятно размером 5–10 мкм, матричным микроскопом для визуальной настройки образца и двухкоординатным сканирующим столиком для перемещения образца в процессе измерений по двум координатам в пределах 0 - 150 мм. Измерения проводятся в автоматическом режиме непосредственно в процессе сканирования исследуемой поверхности и их результаты отображаются в реальном времени в виде цветной карты измеряемой поверхности или в виде трехмерного образа. В эллипсометре проявились достоинства базовой статической схемы: сканирующие измерения проводятся в режиме «нон-стоп», то есть сигналы читаются непрерывно с интервалом 1 миллисекунда в процессе движения столика и согласовываются с его текущей координатой. Это открывает широкие возможности для создания промышленных эллипсометрических установок быстрого картирования полупроводниковых пластин размером 300 мм и выше.

Разновидностью эллипсометрии пространственного разрешения и новым направлением в этой области является *обзорная эллипсометрия (imaging ellipsometry)*. Эллипсометр модели МЭК-2 является одним из представителей этого класса. В качестве фотоприёмного устройства в нем используется ПЗС или КМОП матрица, работающая в паре с проекционным объективом, отображающим плоскость измеряемого образца на матрицу. Такая система позволяет проводить мгновенное картирование оптических параметров по поверхности образца. Отображающая эллипсометрия находит широкое применение в таких областях, как физика полупроводников и диэлектриков, характеристика поверхности и тонких пленок; химия органических соединений, наносенсорика, биология, медицина и др. Наиболее развито использование отображающей эллипсометрии в нанобиотехнологиях для диагностики различных типов биочипов.

Для диагностики и исследования магнитооптических явлений в тонкопленочных магнитных структурах, в том числе для исследования магнитной доменной структуры магнитных материалов, изучения природы магнитооптической активности электронных переходов, измерения индексов намагниченности поверхностных наноструктур впервые в мировой практике были разработаны и созданы эллипсометры нового класса, так называемые магнитоэллипсометры (или Керр-эллипсометры), как одноволновые, так и спектральные.

Быстродействующий вакуумно-измерительный комплекс, со специальной малогабаритной вакуумной камерой, системой нагрева образцов и системой контроля температуры был разработан для изучения свойств тонких пленок в ходе быстрого (импульсного) высокотемпературного их нагрева.

Впервые в эллипсометрии было развито новое направление – эллипсометрия поверхностного плазмонного резонанса. Были созданы одноволновые и спектральные эллипсометрические комплексы, работающие при полном внутреннем отражении. Это обеспечило очень высокую чувствительность к особенностям состояния пограничной

фазы на поверхности и в приповерхностной области, в качестве которой могут выступать растворы биоорганических молекул или их нанослой. Комплексы были разработаны для нужд бионанотехнологий и используются при создании современных биосенсоров и биочипов.

Эллипсометрический комплекс «Эллипс–101 ЭЛХ» был разработан для проведения *in situ* исследований поверхности металлов и полупроводников в процессе электрохимического окисления и роста тонкопленочных оксидных мезопористых структур. Было показано, что при определенном подборе условий процесса под управлением эллипсометра можно получать пленки высокой пористости и малого размера пор, что впервые делает возможным создание управляемого процесса получения неорганических мембран, фильтров и калибровочных решеток с заданным нанометровым периодом повторяемости.

Одним из наиболее перспективных направлений является использование метода эллипсометрии в терагерцовой области частот. На этих частотах в формировании отраженного отклика вовлекаются совершенно иные механизмы взаимодействия света с веществом (так для многих наноматериалов это область фотон-фононного взаимодействия и поглощения свободными носителями заряда). Поэтому эллипсометрия спектрального диапазона 10–100 мкм является чрезвычайно информативной для многих направлений науки и техники. Для проведения исследований в этом диапазоне спектра был разработан эллипсометр терагерцового излучения, который успешно работает в ИЯФ СО РАН.

Приводятся многочисленные результаты экспериментальных исследований различных наноструктур и физико-химических процессов, демонстрирующие высокую точность, чувствительность и информативность разработанной аппаратуры. В сочетании с такими своими свойствами как неразрушаемость и дистанционность проведения измерений, эллипсометры эффективно используются в качестве аналитических средств прецизионной нанометрии и позволяют решать широкий круг задач, возникающих как при научных исследованиях, так и в пооперационном контроле в тонкопленочных нанотехнологиях.

Рассматриваются задачи и проблемы оснащения научных организаций и промышленных предприятий современной эллипсометрической аппаратурой. Даются предложения и рекомендации по этому вопросу.

#### *ЛИТЕРАТУРА*

1. Р.Аззам, Н.Башара. Эллипсометрия и поляризованный свет. М.: Мир, 1981. – 583 с.
2. В.А.Швец, Е.В.Спесивцев, С.В.Рыхлицкий и др. Российские нанотехнологии, т.4, №3-4, 72, (2009).
3. В.А.Швец, Е.В.Спесивцев, С.В.Рыхлицкий. Оптика и спектроскопия, т.97, № 3, 514, (2004).