

ЭЛЛИПСОМЕТРИЯ - ЭФФЕКТИВНЫЙ МЕТОД ДИАГНОСТИКИ ТОНКИХ ПЛЕНОК И НАНОСТРУКТУР

© 2016 г. Е.В. СПЕСИВЦЕВ, С.В. РЫХЛИЦКИЙ, В.А. ШВЕЦ

Институт физики полупроводников им. А.В. Ржанова СО РАН, г. Новосибирск
e-mail: evs@isp.nsc.ru

Современная микро- и наноэлектроника требует использования наноразмерных многослойных тонкопленочных структур со сложной и переменной стехиометрией, а также повышенной точности определения таких физических параметров тонких пленок, как толщина и оптических константы. Это делает необходимым привлечение высокопрецизионных, но доступных и надежных аналитических средств контроля на разных стадиях процесса: от научного исследования до производства конечного продукта. Существует обширный арсенал методов контроля поверхности и эллипсометрия занимает в этом ряду особое место. Это универсальный, всеохватывающий метод, который используется для исследования физико-химических свойств поверхности, ее морфологии, для измерения параметров многослойных структур и характеристики оптических свойств тонких пленок. Этот метод может использоваться на всех ступенях процесса: рост кристаллов, изготовление подложек, оксидирование, напыление, очистка поверхности, травление, металлизация, литография. Такой всеохватностью метод эллипсометрии обладает благодаря своим уникальным свойствам: это неразрушающий, невозмущающий, экспрессный и бесконтактный метод, основанный на анализе состояния поляризации отраженного от образца света[1].

Отраженная световая волна формируется на границах оптически контрастных сред, поэтому эллипсометрические измерения несут информацию об оптической структуре приповерхностной области и тех процессах, которые влияют на ее оптические свойства. В частности, удастся с прецизионной точностью измерять толщину тонкослойных покрытий, кристаллическую структуру и состав материалов, изучать переходные слои, исследовать адсорбционные процессы на границе раздела фаз и многое другое.

Характерными особенностями метода являются высокая чувствительность, и возможность мониторинга в реальном времени, что делает его привлекательным аналитическим средством исследования и контроля различных высокотехнологичных процессов.

Эллипсометрический эксперимент предполагает следующие этапы:

- 1) проведение измерений;
- 2) создание оптической модели, адекватной исследуемой структуре;
- 3) определение оптических параметров этой модели из сопоставления расчетных значений с экспериментом;
- 4) определение физических характеристик исследуемой структуры.

Для измерения эллипсометрических параметров существует большое разнообразие оптических схем. В последние годы при участии авторов в ИФП СО РАН были разработаны и выпускается ряд моделей эллипсометров, в основу которых положена оригинальная запатентованная базовая фотометрическая схема эллипсометрических измерений статического типа [2]. Отличительной особенностью данной схемы является отсутствие подвижных элементов и модуляции сигнала (рис. 1). Благодаря этому

удалось получить высокое быстродействие измерений при хорошей дифференциальной чувствительности и обеспечить возможность работы эллипсометра при слабой интенсивности рабочего излучения. Эти особенности представленной схемы использованы при разработке и создании аппаратуры различного функционального назначения [3-5].

Эллипсометр высокого временного разрешения ЛЭФ-757 может использоваться как в настольном варианте на гониометре (ex-situ), так и в качестве встраиваемого прибора, смонтированного на технологической вакуумной камере для измерения быстропротекающих процессов роста/травления в реальном времени (in situ). В качестве источника света в эллипсометре используется стабилизированный HeNe или полупроводниковый лазер.

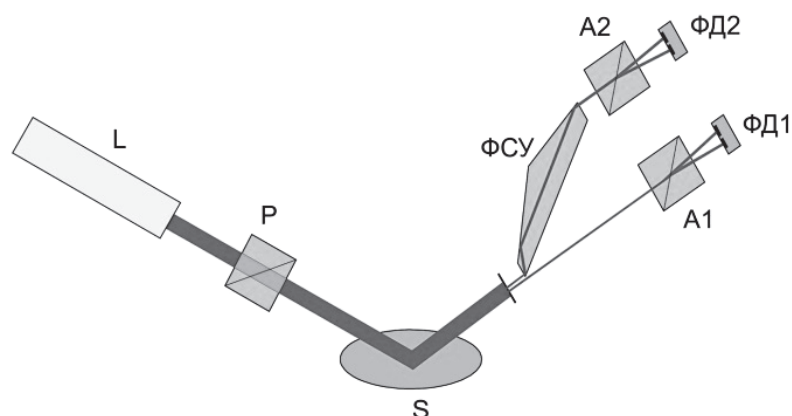


Рис. 1. Статическая схема эллипсометра.

Это обеспечивает высокую точность измерения с высоким быстродействием. Поскольку в данном эллипсометре используется статическая фотометрическая схема без вращающихся элементов и модуляции сигнала, то время измерения определяется только временем накопления и оцифровки сигналов для достижения требуемой точности. Минимальное время измерения в приборе - 40 микросекунд, а оптимальное время, при котором достигается чувствительность измерений поляризационных углов на уровне $0,003^\circ$, составляет 1 миллисекунду. Такие характеристики обеспечивают измерения толщин и оптических параметров пленочных структур с высокой точностью в реальном времени и позволяют исследовать высокоскоростные кинетические процессы адсорбции/десорбции, роста/травления слоев, высокотемпературных нагревов и др.

Спектральный эллипсометр «ЭЛЛИПС-1991». Источником света в спектральном эллипсометре служит короткодуговая ксеноновая лампа или галогенная лампа накаливания, излучение которой разлагается по спектру на отдельные составляющие с помощью автоматического скоростного малогабаритного монохроматора и попадает в оптический тракт эллипсометра. Эллипсометр позволяет проводить измерения в спектральном диапазоне от 350 (250) до 1000 нм за несколько секунд. Для этой цели был разработан специальный быстродействующий монохроматор, обеспечивающий развертку спектра в этом диапазоне за 2 секунды. При этом минимальное разрешение составляет 0.5 нм. Разработан также вариант встраиваемого спектроэллипсометра для высокоинформативного монитора быстропротекающих процессов непосредственно в технологических установках.

Для проведения микроизмерений разработан лазерный *сканирующий эллипсометр высокого пространственного разрешения «МИКРОСКАН-3М».* Он снабжен микрооптикой для фокусировки лазерного излучения в пятно размером 10 микрон, $20\times$ микроскопом/автоколлиматором 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 топограммы измеряемой характеристики или в виде трехмерного образа. В приборе также проявились достоинства базовой статической схемы. Сканирующие измерения проводятся в безостановочном режиме, то есть сигналы считываются непрерывно с интервалом в 1 миллисекунду в процессе перемещения столика и согласовываются с текущей координатой. Это от-

крывает широкие возможности для создания промышленных эллипсометрических установок для быстрого картирования полупроводниковых пластин размером 300 мм и выше.

Все модели эллипсометров имеют соединение с компьютером через USB интерфейс и снабжены программным обеспечением для проведения измерений в различных режимах и интерпретации результатов измерений.

Возможности спектральной эллипсометрии ярко демонстрируются на примере исследования структур «кремний на изоляторе», полученных методом сращивания по технологии Smart-Cut [6]. Измеренные спектры эллипсометрических параметров такой структуры показаны на рис. 2. Используя стандартную трехслойную модель $\text{SiO}_2/\text{Si}/\text{SiO}_2$ на кремниевой подложке удается подобрать толщины всех трех слоев таким образом, чтобы максимально совместить измеренные спектры с расчетными. Однако при этом все равно имело место некоторое расхождение между экспериментом и расчетом. Это расхождение удается устранить только введением в модель переходных слоев на границах кремния и SiO_2 , состоящих из смеси аморфной и кристаллической фаз кремния. В результате моделирования были найдены толщины переходных слоев и их структурный состав, при которых наблюдается полное совпадение экспериментальных и расчетных спектров. Результаты этих расчетов приведены на том же рис. 2. Точность определения искомых параметров составляет доли нанометра по толщине и несколько процентов по составу.

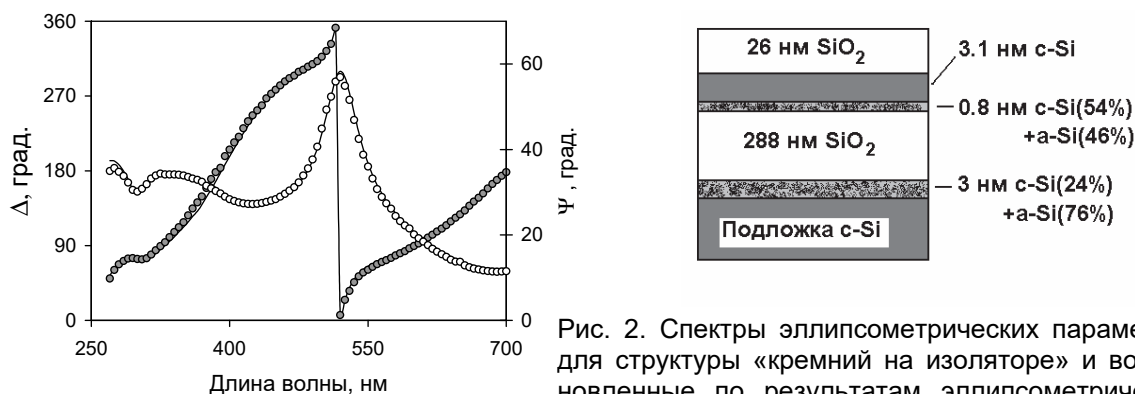


Рис. 2. Спектры эллипсометрических параметров для структуры «кремний на изоляторе» и восстановленные по результатам эллипсометрических измерений значения параметров этой структуры .

Эллипсометрия пространственного разрешения используется при изучении образцов, свойства которых неоднородны по площади. Это могут быть слои неоднородной толщины, различные дефекты или включения, выходящие на поверхность, наконец, структуры, полученные целенаправленным воздействием на образец (например фотолитографией). Во всех этих случаях полезно иметь информацию в виде топограммы распределения характеристик по площади образца.

Другой областью применения пространственно разрешающей эллипсометрии является измерение физических и оптических свойств поверхности малоразмерных элементов, например измерение толщины окисла в вытравленных окнах.

На рис. 3 справа показана топограмма распределения параметра Δ , измеренная для структуры, представляющей фотокатод электронно-оптического преобразователя (ЭОП), а слева - фотоэмиссионное изображение, полученное на ЭОП, изготовленном из той же самой структуры. Наблюдается хорошо заметная корреляция между эмиссионными свойствами ЭОП и картиной распределения параметра Δ : кольцо в центре и отдельные точки, помеченные стрелками. Это области с пониженной или отсутствующей фотоэмиссией.

Физическая причина появления этих областей связана с загрязнением поверхности в процессе изготовления фотокатодной структуры. Замечательно, что эллипсометрические измерения позволяют выявить наличие таких дефектных областей на

ранней стадии изготовления прибора, провести отбраковку структур и избежать последующих дорогостоящих технологических операций.

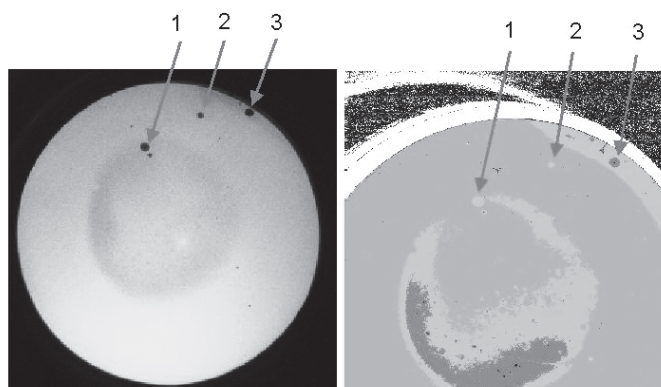


Рис. 3. Топограмма распределения параметра Δ для фотокатодной структуры (справа) и фотоэмиссионное изображение ЭОП, изготовленного из этой структуры. Стрелками помечены дефектные области.

На примере представленных приборных и методических разработок видна несомненная эффективность использования метода эллипсометрии в области прецизионного контроля процессов современной электроники. Примеры эллипсометрических исследований различных структур и процессов показывают высокую точность, чувствительность и информативность метода. В сочетании с такими своими свойствами как неразрушаемость и дистанционность эллипсометрия, выступает в качестве высокоэффективного аналитического метода, позволяющего решать как задачи, возникающие при научных исследованиях, так и в технологическом пооперационном контроле в микро- и наноэлектронике.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Аззам Р., Башара Н. Эллипсометрия и поляризованный свет. – М.: Мир, 1981, с. 83.
2. Швец В.А., Спесивцев Е.В., Рыхлицкий С.В. // Оптика и спектр. – 2004, т. 97, № 3, с. 514-525.
3. Рыхлицкий С.В., Спесивцев Е.В., Швец В.А., Прокопьев В.Ю. Спектральный эллипсометрический комплекс «ЭЛЛИПС-1771 СА» // ПТЭ, 2007, № 2, с. 160-161.
4. Рыхлицкий С.В., Спесивцев Е.В., Швец В.А., Прокопьев В.Ю. Сканирующий эллипсометрический комплекс МИКРОСКАН-3М // ПТЭ, 2005, № 3, с. 155-156.
5. Спесивцев Е.В., Рыхлицкий С.В., Назаров Н.И. Автоматический сканирующий микроэллипсометр. // Автометрия, 1997, № 1, с. 100.
6. Popov V.P., Antonova I.V., Stas V.F., Gutakovskii A.K., Spesivtsev E.V., Mardegzhov A.S., Franzusov A.A., Feofanov G.N. Properties of extremely thin silicon layer in silicon-on-insulator structure formed by smart-cut technology. // MAT SCI ENG B-SOLID – 2000, APR 3, 73: p. 82-86.