

ОБЩИЕ ВОПРОСЫ

1. Что такое спектральная эллипсометрия (без математики)?

Спектральная эллипсометрия является неразрушающим, бесконтактным и неинвазивным оптическим методом, который основан на явлении изменения поляризации света при отражении под углом от образца тонкой пленки. В эллипсометрии используются различные модели для определения толщины слоев, толщины границ раздела, величины шероховатости поверхности, а также оптических свойств и множества других параметров тонких пленок в диапазоне толщин от единиц ангстрем до десятков микрон. Исследования методом спектральной эллипсометрии могут проводиться как *ex-situ*, так и *in-situ*, в статическом или динамическом режиме, в различных областях применения.

2. Что такое спектральная эллипсометрия (с математикой)?

Спектральная эллипсометрия измеряет параметры ψ и Δ , описывающие эллиптическую поляризацию света, которую приобретает линейно поляризованный свет после отражения под углом от образца тонкой пленки. Параметры ψ и Δ связаны с комплексными коэффициентами отражения Френеля в соответствии с формулами: $\rho = \tan \psi$, $e^{i\Delta} = r_p/r_s$. Для определения толщины и / или оптических констант после измерения ψ и Δ строится модель, соответствующая структуре пленки.

3. Каковы преимущества спектральной эллипсометрии?

Спектральная эллипсометрия является неразрушающим бесконтактным методом и позволяет определять одновременно несколько свойств пленки. Это быстрая методика, не требующая подготовки образцов. Она использует широкий спектральный диапазон 190-2100 нм. Также эта методика оказывается весьма точной, воспроизводимой и чувствительной при исследовании плёнок тоньше 10 нм. Спектральная эллипсометрия применима практически к любым тонкопленочным материалам и идеально подходит для применения *in-situ*.

4. Какие материалы могут быть исследованы методом спектральной эллипсометрии?

Метод спектральной эллипсометрии подходит для исследования полупроводников, диэлектриков, полимеров, различных органических веществ и металлов. Эллипсометрия также может быть использована для изучения границы раздела твердое тело-жидкость или границы раздела жидкость-жидкость.

5. Что обозначают параметры I_s , I_c и I_c' ?

Как правило, эллипсометры не измеряют ψ и Δ непосредственно. Вместо этого они измеряют функции ψ и Δ . В случае эллипсометров с фазовой модуляцией, таких, как UVISEL и UVISEL 2, тремя измеряемыми величинами являются I_s , I_c и I_c' , которые являются функциями ψ и Δ в соответствии с формулами: $I_s = \sin^2 \psi \sin \Delta$, $I_c = \sin 2\psi \cos \Delta$, and $I_c' = \cos 2\psi$. Будучи объединены, I_s и I_c обеспечивают точное измерение Δ во всем диапазоне от 0° до 360° , а I_s и I_c' обеспечивают точное измерение ψ в диапазоне от 0° до 90° .

6. Что можно измерить с помощью *ex-situ* спектральной эллипсометрии?

Важно отметить, что спектральная эллипсометрия является косвенным методом, который не измеряет напрямую толщину пленки и/или оптические свойства. Эти параметры определяются путем расчета с использованием определенной модели. *Ex-situ* спектральная эллипсометрия позволяет определить различные свойства тонких пленок: толщину слоя, величину шероховатости,

толщину границы раздела, оптические постоянные, состав, ширину запрещенной зоны, кристалличность, градиентность, анизотропию и однородность по глубине и площади. Она также может быть использована для расчета коэффициента деполяризации и коэффициентов матрицы Мюллера.

7. Какие параметры можно измерять методом спектральной эллипсометрии in-situ в режиме реального времени?

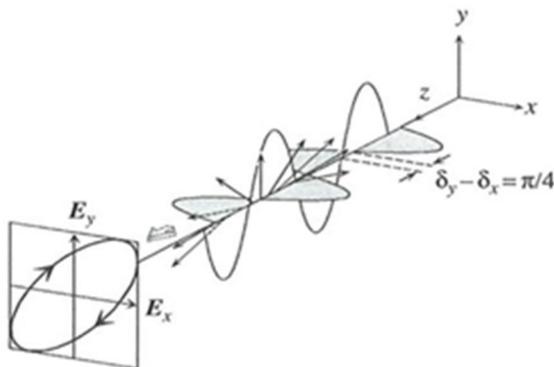
Важно отметить, что спектральная эллипсометрия является косвенным методом, который не измеряет напрямую толщину пленки и/или оптические свойства. Эти параметры определяются путем расчета с использованием определенной модели. Кроме определения толщины и оптических свойств, в режиме in-situ спектральная эллипсометрия может быть использована для определения параметров зародышеобразования и роста пленок, для точного определения оптических свойств пленок с малой шероховатостью или окислов, а также для исследования профилей роста пленки.

8. Можно ли с помощью спектральной эллипсометрии измерять неизвестные образцы?

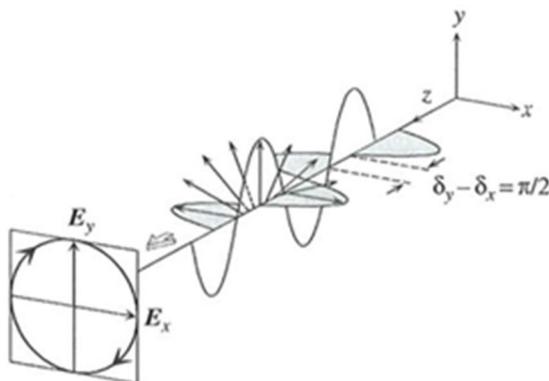
Поскольку эллипсометрия является методом на основе модели, желательно заранее знать какие-либо параметры образца (количество слоев, материалы и т.д.). Однако, если об образце практически ничего не известно, он может быть изучен методом эллипсометрии, если предположить, что он представляет собой один слой материала на определенной подложке. Также эллипсометрия может быть использована для определения оптических свойств подложки из неизвестного материала.

9. Что такое поляризация, и какие типы поляризации существуют?

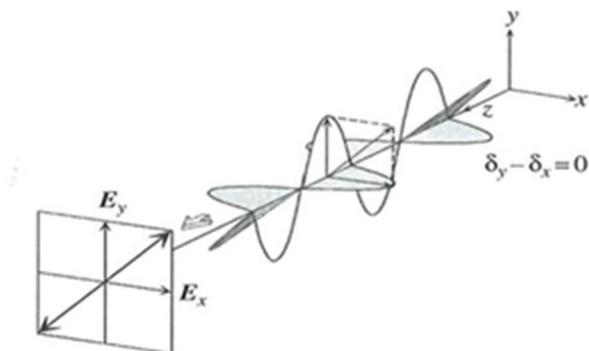
Поляризация определяется ориентацией и фазой вектора напряженности электрического поля. Мы можем определить поляризацию как суперпозицию двух ортогональных волн. Наиболее общее состояние поляризации, известное как эллиптическое, соответствует произвольной разности фаз и произвольному отношению амплитуд двух ортогональных волн.



Два специальных случая эллиптической поляризации известны как круговая и линейная поляризация. Для получения круговой поляризации две ортогональные волны должны быть сдвинуты по фазе на 90° и иметь равные амплитуды.



Чтобы получить линейную поляризацию, две ортогональные волны должны быть в фазе, при этом они могут иметь произвольные амплитуды.



Изображения взяты из книги Fujiwara, H. «Spectroscopic Ellipsometry Principles and Applications», John Wiley and Sons, 2007.

10. Что подразумевается под термином «оптические свойства»?

Оптические свойства материала описываются двумя параметрами: показателем преломления (коэффициентом рефракции) и коэффициентом экстинкции. Показатель преломления обозначается n и представляет собой отношение скорости света в вакууме к скорости света в веществе. Коэффициент экстинкции обозначается k и определяет величину потерь на поглощение в веществе. Вместе эти два компонента составляют комплексный показатель преломления, выражающийся как $N = n - ik$, который описывает взаимодействие электромагнитного излучения с веществом (изменение скорости и величину поглощения).

11. Какой диапазон толщин может быть измерен методом спектральной эллипсометрии?

В зависимости от типа материала, методом эллипсометрии можно измерить толщину от нескольких ангстрем до десятков микрон. Глубина проникновения света в материал зависит от коэффициента поглощения. Важно иметь в виду, что для оптически непрозрачных образцов, таких, как металлические пленки, толщина которых превышает 60 нм, методом эллипсометрии можно определить оптические свойства, но нельзя определить толщину пленки. Это связано с сильным поглощением в металлах, и, следовательно, с очень малой глубиной проникновения света. С другой стороны, для прозрачных или полупрозрачных образцов, максимальная толщина, измеримая с помощью эллипсометра, зависит от спектрального разрешения прибора.

12. Какой спектральный диапазон имеют эллипсометры HORIBA Scientific?

В зависимости от прибора, спектральный диапазон может быть от 145 нм до 2100 нм. В частности, приборы Auto SE и Smart SE имеют фиксированный спектральный диапазон от 450 нм до 1000 нм, система UVISEL предлагает четыре различных спектральных диапазона: 190-880 нм, 210-880 нм, 245-2100 нм и 190-2100 нм, а спектральный диапазон UVISEL 2 составляет 190-1000 нм (с дополнительным расширением NIR до 2100 нм). Кроме этого, компания HORIBA предлагает UVISEL 2-VUV, который имеет спектральный диапазон 145-880 нм, также с дополнительным расширением NIR до 2100 нм. Чтобы решить, какой спектральный диапазон лучше подходит для ваших приложений, можно обратиться к двум следующим разделам «Часто задаваемых вопросов».

13. Что можно узнать из ближней инфракрасной области спектра (NIR)?

Ближняя ИК область используется для измерения толщины материалов, поглощающих в видимой области спектра, а также толстых образцов. NIR-область также может быть полезна, если необходимо узнать оптические свойства материала в этой области спектра.

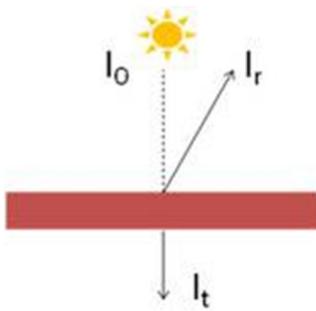
14. Что можно узнать из FUV диапазона?

FUV область используется для определения ширины запрещенной зоны, кристалличности, состава и поглощения диэлектриков и полупроводников. Этот диапазон также помогает измерять ультра-

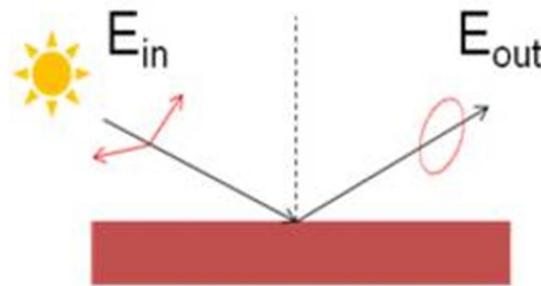
тонкие пленки и пленки с малым различием индексов преломления. Кроме того, измерения в диапазоне FUV являются необходимыми в приложениях, в которых необходимо знать оптические свойства материала в этом диапазоне (например, в фотолитографии).

15. В чем разница между спектральной эллипсометрией и рефлектометрией?

Методы спектральной эллипсометрии и рефлектометрии являются бесконтактными оптическими методами, и оба метода требуют моделирования для получения результата. Рефлектометрия измеряет отношение интенсивности падающего и отраженного света, в то время как спектральная эллипсометрия измеряет изменение поляризации света (т. е. изменение вектора напряженности электрического поля).



Рефлектометрия

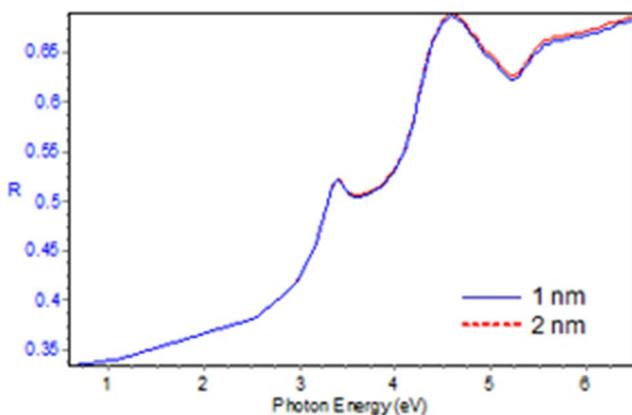


Эллипсометрия

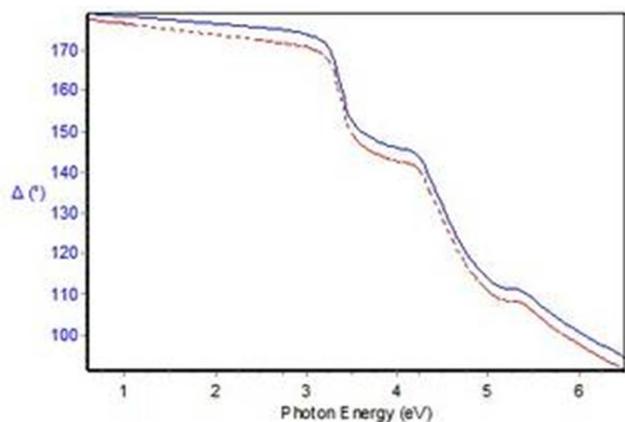
Рефлектометрия не чувствительна к небольшим изменениям в толщине пленки, так что, как правило, используется на толстых (> 100 нм) образцах, в то время как метод эллипсометрии очень чувствителен в приложении к ультратонким пленкам. На рисунках ниже показаны результаты исследования методом рефлектометрии (вверху) и измерения параметра Δ методом эллипсометрии (внизу) для естественного оксидного слоя на c-Si. Очевидно, что рефлектометрия не чувствительна к сверхтонким слоям, в отличие от эллипсометрии.

Кроме того, поскольку рефлектометрия основана на измерении интенсивности, флуктуации интенсивности излучающей лампы могут влиять на результат. Метод эллипсометрии основан на измерении поляризации, поэтому интенсивность лампы влияет только на отношение сигнала к шуму. В дополнение к этому, эллипсометр может измерять коэффициенты отражения и пропускания.

Результаты рефлектометрии:



Результаты эллипсометрии:



16. Что лучше выбрать для измерения толщины, рефлектометрию или эллипсометрию?

Рефлектометрия способна измерять однослойные толстые пленки (> 100 нм), но не обладает достаточной чувствительностью для работы с тонкими пленками (<100 нм). Рефлектометрия обычно используется для однослойных прозрачных пленок; этот метод не подходит для многослойных, анизотропных, поглощающих образцов, а также для градиентных образцов.

17. Каковы области применения спектральной эллипсометрии?

В принципе, спектральная эллипсометрия применяется в любой области, в которой есть тонкие пленки: в фотовольтаике, микроэлектронике и полупроводниковой промышленности, в производстве плоских дисплеев и оптических покрытий, в оптоэлектронике, металлургии, биохимии, нанотехнологиях, в производстве полимеров и органических материалов. Методом эллипсометрии можно измерять, в частности, следующие материалы, используемые в вышеуказанных приложениях: c-Si, a-Si, p-Si, mc-Si, CdTe, CIGS, CdS, SiN, SiC, GaAs, AlGaAs, AlN, InGaN, SnO₂, SiO₂, PET, PEN, ZnO, PbS, PbSe, TiO₂, Al, Ag, Au и углеродные нанотрубки.