

- навыки проведения измерений свойств и контроля качества используемых материалов;
- навыки и умение интерпретировать результаты инструментальных измерений, в том числе измерений наноразмерных объектов (результатов оптической и рентгеновской спектроскопии, термических методов анализа, рентгеновской дифракции, электронной и оптической микроскопии и др.).

2.7. Оптико-физические методы исследований – 36 часов

(д.т.н., профессор кафедры КЭОП Василевский А.М., к.т.н., доцент каф.

КЭОП Коноплев Г.А., к.ф.-м.н., доцент каф. МЭ Панов М.Ф.)

Обязательным этапом производства тонкопленочных солнечных модулей на основе аморфного и микрокристаллического кремния по технологии «Oerlicon» является контроль оптических характеристик стеклянных подложек, осаждаемых пленок кремния и вспомогательных слоев, включая прозрачные электроды. Данная задача решается, в том числе, в рамках методов абсорбционного спектрального анализа и эллипсометрии.

Абсорбционная спектрометрия в оптическом диапазоне широко используется в оптоэлектронной технологии для диагностики тонких пленок полупроводников и диэлектриков. Данные спектрального анализа позволяют определить спектральные характеристики пропускания, оценить энергетический спектр материала, степень структурного совершенства, показатель преломления и толщину пленки. Особенно актуально применение абсорбционной спектрометрии для контроля аморфных и микрокристаллических пленок используемых в технологии «Oerlicon», положение и форма края фундаментального поглощения которых существенным образом зависят от параметров технологического процесса.

На завершающем этапе производства по технологии «Oerlicon» производится тестирование модулей с применением эталонных источников (имитаторов солнечного излучения), что связано с измерением энергетических и пространственных характеристик падающего излучения. Данная задача решается в рамках фотометрии с помощью специализированных приборов – фотометров.

Рассматриваемые вопросы являются предметом курса «Оптико-физические методы исследований». Программа курса состоит из введения и трех основных тем: основы фотометрии, основы спектрального анализа и поляризационные методы исследования.

Тема 1 посвящена физическим основам фотометрии и фотометрической аппаратуре, включая приборы для измерения параметров солнечного излучения.

Тема 2 посвящена физическим основам спектрального анализа и спектральной аппаратуре. В рамках темы выполняется лабораторная работа.

Тема 3 дает базовые понятия для изучения материала, посвященного эллипсометрии - метода исследования, в котором информацию о характеристиках пленки несет состояние поляризации отраженного излучения.

Содержание курса

Введение. Оптический диапазон длин волн. Ультрафиолетовая, видимая и инфракрасная области спектра. Длина волны и частота.

Спектральные и интегральные измерения. Основные законы излучения: закон Планка, закон Стефана-Больцмана. Спектр излучения Солнца: вне атмосферы, на поверхности Земли. Солнечная постоянная.

Тема 1. Основы фотометрии. Энергетическая система величин в оптике: поток излучения, сила излучения, энергетическая освещенность (облученность), энергетическая светимость (излучательность), энергетическая яркость.

Фотометрическая система величин: световой поток, сила света, освещенность, светимость, яркость.

Связь между энергетическими и фотометрическими величинами. Кривая относительной видности человеческого глаза.

Отражение, поглощение и пропускание излучения. Коэффициенты пропускания и поглощения, коэффициенты яркости. Ламбертовский рассеиватель.

Методы субъективной фотометрии: метод квадратов расстояний, метод Тальбота, метод косинусов. Приборы визуальной фотометрии.

Основы объективной фотометрии. Источники и приемники излучения, применяемые в фотометрических приборах. Фотометры сравнения и фотометры

прямого отсчета. Приборы для измерения характеристик солнечного излучения (пиргелиометры).

Метрологическое обеспечение энергетической фотометрии. Эталоны энергетической фотометрии.

Тема 2. Основы спектрального анализа. Виды спектрального анализа. Назначение спектрального прибора. Методы эмиссионной и атомно-абсорбционной спектроскопии. Оптико-электронный прибор как пространственно-спектральный фильтр. Основные характеристики спектральных приборов.

Дифракционная решетка и ее характеристики. Источники излучения в спектральном приборе. Монохроматоры и полихроматоры.

Спектрометры и спектрофотометры. Выбор параметров в спектрометрах и спектрофотометрах. Особенности приборов классического типа и приборов на основе многоэлементных фотоприемников.

Исследование тонких пленок методами оптической спектрометрии.

Тема 3 Поляризационные методы исследований. Линейно-, эллиптически-, циркулярно-поляризованное излучение. Матричный способ описания состояния поляризации. Анизотропные среды. Методы анализа состояния поляризации излучения. Искусственная анизотропия: электрооптические, магнитооптические и акустооптические эффекты и устройства. Применение поляризационных методов для исследования оптических характеристик материалов.

Тема 4. Фурье-спектроскопия. Известно, что, обладая высокой растворимостью в кремнии, водород замыкает на себе (насыщает) вызванные немонокристалличностью материала разорванные связи, в результате чего в таком “гидрогенизированном” материале снижается плотность нелокализованных состояний в запрещенной зоне до 10^{16} – 10^{17} см³ и поднимаются времена жизни носителей заряда. За счёт присутствия гидридных групп и создается предпосылка для широкого использования такого высокотехнологичного материала, как α -Si:H в солнечной энергетике.

Интерес к оптическим свойствам пленок аморфного гидрогенизированного кремния α -Si:H в инфракрасной области спектра вызван, прежде всего тем, что эти

свойства в известной степени определяются взаимодействием излучения с колебательными модами гидридных групп. В материале α -Si:H, в отличие от монокристаллического кремния, процессы решеточного поглощения несколько иные в связи с присутствием водорода, образующего структурные группы SiH, SiH₂ и полимерные цепочки (SiH₂)_n. В частности, для группы SiH характерны две полосы, соответствующие моде продольных колебаний на 2000 см⁻¹ и моде вращательных колебаний на 630–640 см⁻¹. Группе SiH₂ приписываются три типа продольных колебаний при 2090–2100 см⁻¹, моду вращения связи с частотой 880 см⁻¹. Форма вхождения водорода в структуру α -Si:H зависит от условий осаждения. В хороших пленках, осажденных при температуре более 480 К, основная часть водорода существует в виде моногидрида. Пленки, осажденные при более низких температурах подложки, содержат значительные количества дигидрида и короткие полимерные цепи.

Таким образом, ИК-спектроскопия является ключевым методом в технологии определения формы вхождения водорода в фоточувствительные слои α -Si:H. Известен также метод определения концентрации водорода из ИК-спектров. Для этого применяются методы эффузии в замкнутом объеме, которые позволяют связать интенсивность полос в спектре ИК-поглощения, обусловленных с колебательными модами кремниево-водородных групп, с содержанием водорода.

Наиболее перспективным методом ИК-спектроскопии является Фурье-спектроскопия (FT-IR spectroscopy). Преимущества Фурье-спектрометров, по сравнению со спектрометрами дифракционными, заключаются в следующем. Во-первых, за каждый интервал времени сканирования получается информация сразу обо всем спектральном диапазоне, в то время как в обычном дифракционном спектрометре за то же время получается информация только об узком спектральном интервале, попадающем на выходную щель прибора. Это свойство, называемое мультиплекс-фактором, позволяет с помощью многократного сканирования существенно снизить относительный уровень шумов определяемого спектра. Во-вторых, на входе интерферометра, основного элемента оптической схемы Фурье-спектрометра, может быть размещен источник излучения с большим диаметром

пучка. В интерферометре как у источника, так и у приемника могут быть использованы большие телесные углы. Все это позволяет получать высокое разрешение, в то время, как разрешение дифракционного спектрометра обратно пропорционально ширине щели прибора, а энергия, падающая на приемник, пропорциональна квадрату площади щели.

Таким образом, Фурье-спектроскопия является важнейшим методом контроля физических и химических параметров гидрогенизированного кремния для солнечной энергетики, а Фурье-спектрометр – важнейшей частью оборудования для такого контроля. В раздел программы обучения, связанный с применением Фурье-спектроскопии, включено знакомство с математической процедурой обработки результатов измерений Фурье-спектрометрами, с различными режимами их работы, с их функциональными узлами и приставками (назначение, конструкции, материалы), с подготовкой образцов, что даст необходимые навыки самостоятельного составления и постановки методик измерения, а также навыки проведения измерений свойств и контроля качества используемых материалов. Полученные слушателями знания по физике α -Si:H, активного материала солнечной энергетики, позволят им приобрести навыки интерпретации результаты ИК-измерений.

Дополнительным разделом для обучающихся могло бы стать знакомство с прикладной программой, управляющей работой Фурье-спектрометра, особенностями работы прибора в других спектральных диапазонах (например, дальнем инфракрасном), с интерактивными способами обработки спектров и их интерпретации с помощью встроенной базы данных спектров.

Тема 5. Эллипсомерия. Технологический процесс создания солнечных модулей на основе аморфного кремния включает в себя операции создания токопленочных прозрачных контактов и активных p-i-n-структур на основе слоев аморфного кремния. Каждая из операций по получению тонкого слоя на подложке или структуре, требует технологической отработки, связанной с этапом обязательного контроля толщины пленки и её показателя преломления, возможного наличия

поверхностного слоя или шероховатости поверхности, а также внутренней пористости.

Важнейшим методом неразрушающего оптического контроля тонких (до 1000 нм) слоев и поверхностей является отражательная эллипсометрия. Эллипсометрия представляет собой оптический метод, позволяющий определять свойства границы раздела двух сред или находящихся между ними системы пленок, а также наблюдать происходящие здесь явления. Метод эллипсометрии заключается в измерении изменения поляризации света при отражении от поверхности (эллипсометрия отражения) и последующем вычислении по результатам измерения параметров поверхности или структуры. Название “эллипсометрия” связано с тем фактом, что прибор, называемый эллипсометром, измеряет изменение параметров эллипса поляризации при отражении от поверхности. Эллипсометрия является высокочувствительным методом исследования, а в случае сверхтонких прозрачных (субангстремных) слоев практически единственным.

В раздел программы обучения, связанный с применением эллипсометрии входят знакомство с основным уравнением эллипсометрии, с решением прямой и многообразным методом решения обратной задач эллипсометрии. Это позволит слушателям приобрести навыки выбора и постановки методик измерения. Знакомство с основными компонентами оптической схемы эллипсометра, их назначением, методикой подготовки и установки образцов, правилами определения эллипсометрических углов позволит приобрести навыки проведения эллипсометрических измерений.

В программу курса включен раздел, связанный с оценкой точности эллипсометрических измерений, что даст возможность получить навыки и умение в интерпретации результатов эллипсометрических измерений.

Дополнительным для слушателей материалом в разделе “эллипсометрия” могло бы стать знакомство с методикой использования современных спектроскопических эллипсометров, с новыми современными приложениями эллипсометрического метода, с методами автоматизации эллипсометрических измерений, с примерами задач нано- и микро- технологии, решение которых оказалось возможно благодаря

применению отражательной эллипсометрии, а также с программным комплексом, предназначенным для управления эллипсометрическими измерениями и расчетами.

Лабораторная работа. Исследование инструментальных и методических погрешностей спектральных измерений

Цель работы: ознакомление с устройством многоканального автоматизированного УФ-спектрофотометра; расчет спектрального разрешения и линейной дисперсии прибора, проведение градуировки по длинам волн; изучение способов уменьшения влияния шумов и повышения точности измерений; исследование спектров пропускания тонких диэлектрических пленок.

Содержание работы

Спектрофотометр: назначение, принцип работы, устройство. Расчет спектрального разрешения и дисперсии спектрофотометра с вогнутой дифракционной решеткой и многоэлементным приемником. Устройство и основные технические характеристики спектрофотометра. Градуировка прибора по длинам волн по линиям излучения ртутной лампы. Исследование влияния времени накопления заряда в ПЗС-линейке и числа представлений спектра, по которым проводится усреднение, на погрешность измерения коэффициента пропускания. Исследование спектров пропускания тонких диэлектрических пленок на прозрачной подложке: определение формы края фундаментального поглощения, определение ширины запрещенной зоны.

В результате изучения дисциплины «Оптико-физические методы исследований» слушатели будут обладать следующими компетенциями:

- физические основы солнечной фотоэнергетики;
- базовые знания оборудования и методов контроля технологических процессов, физических и химических параметров;
- навыки лабораторной работы с материалами солнечной фотоэнергетики;
- навыки составления и постановки методик измерения;
- навыки проведения измерений свойств и контроля качества используемых материалов; навыки и умение интерпретировать результаты

инструментальных измерений, в том числе измерений наноразмерных объектов;

- знание методов и оборудования для обеспечения автоматизации технологических процессов, непрерывного технологического контроля;
- навыки проведения испытаний материалов солнечной фотоэнергетики.

2.8. Методы измерения параметров солнечных модулей – 36 часов

**(к.ф.-м.н., с.н.с. Шварц М.З, к.ф.-м.н.,
ассистент каф. КЭОП Гудовских А.С.)**

Обязательным этапом производства тонкопленочных солнечных модулей на основе аморфного и микрокристаллического кремния по технологии «Oerlicon» является контроль параметров солнечных модулей. Помимо выходного контроля параметров тонкопленочных солнечных модулей изготавливаемых по технологии «Oerlicon» необходимо проводить, по крайней мере, выборочный контроль на промежуточных этапах производства, в частности, перед процессом ламинирования. Для проведения контроля характеристик солнечных модулей необходима разработка методов измерений параметров тонкопленочных солнечных элементов, изготавливаемых по технологии «Oerlicon», с учетом их конструктивной особенности, заключающейся в последовательном соединении двух фотоактивных переходов, реализованных на основе различных материалов: аморфном и микрокристаллическом кремнии, так называемые тандемные солнечные элементы.

Дисциплина «Методы измерения параметров солнечных модулей» направлена на подготовку слушателей в области разработки и применения методов измерений параметров тандемных тонкопленочных солнечных элементов и солнечных модулей на основе аморфного и микрокристаллического кремния. В рамках курса предусмотрено изучение следующих основных тем: характеристики солнечного излучения и их моделирование на имитаторах солнечного излучения. Эталонные солнечные элементы (СЭ), требования к эталонам, их калибровка и поверка. Спектральные и вольт-амперные характеристики (ВАХ) солнечных элементов и модулей, методы и средства для их экспериментальных исследований, влияние