

В настоящее время в деятельность изыскательских и проектных организаций быстро проникает компьютеризация, поднимающая проектную работу на качественно новый уровень, при котором резко повышаются темпы и качество проектирования, более обоснованно решаются многие сложные инженерные задачи, которые раньше рассматривались лишь упрощенно. Во многом это происходит благодаря использованию эффективных специализированных программ, которые могут быть как самостоятельными, так и в виде приложений к общетехническим программам. Деятельность по созданию программных продуктов и технических средств для автоматизации проектных работ имеет общее название - САПР.

САПР (англ. CAD, Computer-Aided Design) – программный пакет, предназначенный для проектирования (разработки) объектов производства (или строительства), а также оформления конструкторской и/или технологической документации.

Компоненты многофункциональных систем САПР традиционно группируются в три основных блока CAD, CAM, CAE. Модули блока CAD (Computer Aided Design) предназначены в основном для выполнения графических работ, модули CAM (Computer Aided Manufacturing) - для решения задач технологической подготовки производства, модули CAE (Computer Aided Engineering) - для инженерных расчетов, анализа и проверки проектных решений.

Система AutoCAD 2012 представляет собой систему автоматического проектирования, относящуюся к классу так называемых CAD-систем. То есть эта система предназначена для подготовки технической документации и позволяет строить чертежи практически любой сложности, а также выполнять основной набор действий по трехмерному моделированию. Сейчас же наибольшее распространение имеют AutoCAD 2009, AutoCAD 2010, AutoCAD 2011 и AutoCAD 2012.

В основе организации окна AutoCAD 2012 лежит ленточный интерфейс. То есть вместо использования разрозненных панелей инструментов и строки меню разработчики AutoCAD предложили использовать так называемую ленту инструментов. Если вы работали когда-нибудь хотя бы с одним из приложений пакета Microsoft Office 2007 и 2010 (Word, Excel и т.п.), понятие ленты инструментов вам должно быть знакомо. В версиях AutoCAD до 2009 использовался другой интерфейс, основанный на строке меню и панелях инструментов. Также в AutoCAD сохранена возможность использования и строки меню, и панелей инструментов совместно с лентой инструментов, так что вы сможете сами выбрать наиболее подходящую для вас организацию окна AutoCAD.

В настоящее время создано и успешно применяется несколько десятков программных продуктов, позволяющих эффективно создавать самые сложные современные проекты. Пакет компьютерного проектирования ArchiCAD 12 от компании GraphiSoft предоставляет широкие возможности плоскостного и трехмерного моделирования объекта, а также его качественной визуализации, включая создание фотореалистических изображений и сцен виртуальной реальности.

Программное обеспечение компании Graphisoft является на данный момент одной из лучших систем архитектурно-строительного проектирования, которое с помощью концепции Виртуального Здания (Virtual Building) реализует уникальную технологию Информационного Моделирования Зданий (Building Information Modeling - BIM). ArchiCAD - мощная среда 3D-моделирования для работы с объектами по современным технологиям. Система разработана специально для архитекторов: инструментарий программы позволяет строить чертежи и модель из привычных объектов (стен, колонн, перекрытий и т.д.), а интерфейс программы интуитивно ясен. При работе в ArchiCAD не просто создаются отдельные чертежи, а разрабатывается полный набор документации по проекту в одном файле.

УДК 537.11

ЭЛЛИПСОМЕТРИЯ ТОНКИХ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПЛЕНОК

К.ф.-м.н. Петлицкий А.Н., Крекотень Н. А., Коледа Т.Н., Леонтьев А.В.

ОАО «Интеграл» - управляющая компания холдинга «ИНТЕГРАЛ»

Белорусский государственный университет

В настоящее время термически выращенный слой SiO₂ является основным материалом, используемым в качестве подзатворного, туннельного и конденсаторного диэлектриков ИМС с проектными нормами до 0,18 мкм. При уменьшении длины затвора до 0,18 мкм толщина слоя диоксида кремния уменьшается до 3 нм. С уменьшением толщины диоксида кремния менее 10

нм переходная область от кремния к диоксиду кремния начинает оказывать существенное влияние на свойства пленки диоксида кремния, в том числе и оптические.

Одним из наиболее точных неразрушающих методов измерений оптических параметров и толщин тонких пленок является эллипсометрия. Однако при измерениях пленок толщиной меньше 10нм возникают трудности интерпретации полученных результатов из-за неадекватности представленной модели реальному образцу и соответствием дисперсионных характеристик слоев материалам структуры [1]. Параметры таких пленок очень неустойчивы относительно экспериментальных ошибок измеряемых поляризационных углов. Таким образом, обратная задача для сверхтонких пленок обладает выраженной математической некорректностью. Ее решение на основе классического подхода, когда неизвестные параметры определяются по абсолютному (наиболее глубокому) минимуму функционала обратной задачи и, следовательно, математическая некорректность задачи не учитывается, приводит к физически нереальным результатам. Эффект этого рода, наблюдаемый при исследовании сверхтонких пленок, очевидно, должен ослабевать с увеличением толщины пленки, что действительно наблюдается на исследуемых образцах. Данный эффект зависит также и от количества углов падения в используемом для определения функционала обратной задачи наборе.

Модель должна включать не только подложку и пленку, но и неоднородный переходной слой подложка-пленка. Так, если при измерениях толстых пленок, влияние переходного слоя на результаты незначительное, то при измерениях тонких пленок толщина переходного слоя соизмерима с толщиной пленки и ее влияние необходимо учитывать при расчетах. В качестве критерия адекватности модели реальному образцу в этом случае выбирается значение целевой функции или функционала невязки:

$$I(x_j) = \sum_{k=1}^m \{ [\psi_e(\varphi_0, \lambda_k) - \psi(\varphi_0, \lambda_k, x_j)]^2 + [\Delta_e(\varphi_0, \lambda_k) - \Delta(\varphi_0, \lambda_k, x_j)]^2 \},$$

где $\psi_e(\varphi_0, \lambda_k)$, $\Delta_e(\varphi_0, \lambda_k)$ – экспериментальные эллипсометрические данные и $\psi(\varphi_0, \lambda_k, x_j)$, $\Delta(\varphi_0, \lambda_k, x_j)$ соответствующие рассчитанные параметры.

В формуле ($j = \overline{1, m}$) вещественные параметры электродинамической модели однослойной структуры, m – число углов падения для фиксированной длины волны (многоугольная эллипсометрия). Оптимальные значения x_j определяются из условия глобального минимума функции $I(x_j)$. Так как параметры $\psi(\varphi_0, \lambda_k, x_j)$ и $\Delta(\varphi_0, \lambda_k, x_j)$ измеряются обычно с неопределенностью $\pm 0,01^0$, то при толщине слоя значительно меньшей длины волны ($d \ll \lambda$) можно указать большое число математических функций электродинамических моделей, приводящих к одинаковым параметрам $\psi(\varphi_0, \lambda_k, x_j)$ и $\Delta(\varphi_0, \lambda_k, x_j)$, а в итоге – к одинаковым локальным минимумам функции.

В нашем случае обсуждается решение обратной задачи эллипсометрии для окисленных кремниевых пластин с разными поверхностными слоями. Эксперименты выполнены на пластинах 200КДБ12, обработанных в ПАР-ПСР и буферном растворе. Затем на пластинах проводилось пирогенное окисление при температуре 800^0 в атмосфере O_2 (расход 5.0 л/мин), N_2 (расход 5.0 л/мин) и N_2 (расход 6.0 л/мин) в течение от 5 до 15 минут. Неоднородности поверхности образцов моделировались слоем поляризованных диполей (α_{z1}) на слое (n_2, k_2, d_2), а неоднородности контактной зоны $SiO_2 - Si$ -слоями поляризованных диполей (α_{z3}) на слое (n_4, k_4, d_4) и под ним (α_{z5}). В такой оптической модели n_6 и k_6 -параметры подложки. Для технологии получения таких структур практический интерес представляет переходная зона $SiO_2 - Si$ [2]. Измерения поляризационных углов $\psi_e(\varphi_0, \lambda_k)$ и $\Delta_e(\varphi_0, \lambda_k)$ проводились на лазерном эллипсометре ЛЭФ 3М-1 ($\lambda=632,8$ нм) методом многоугольной эллипсометрии на углах падения от 60^0 до 77^0 (рис.1).

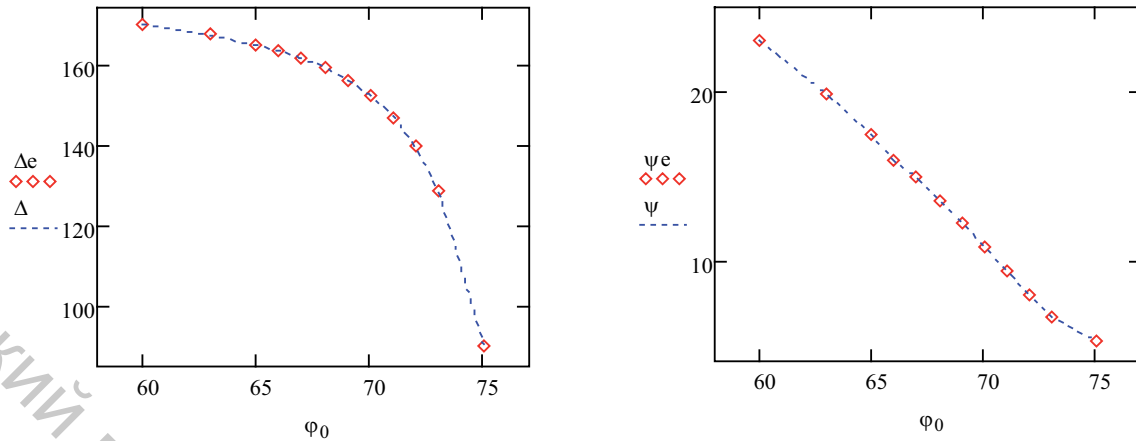


Рисунок 1 – Измеренные (точки) и теоретические (штриховые) поляризационные углы при разных углах падения φ_0 для образца №08.

В таблице 1 даны значения толщин пленки SiO_2 , а также толщин и оптических параметров переходного слоя $\text{SiO}_2\text{-Si}$ измеренных и рассчитанных методом многоугловой эллипсометрии.

Таблица 1 – Результаты расчетов толщин пленки SiO_2 и оптических параметров переходного слоя $\text{SiO}_2\text{-Si}$ методом многоугловой эллипсометрии

№	d SiO_2 , Å	Переходной слой $\text{SiO}_2\text{-Si}$		
		n	χ	d, Å
02	26	2,5	0,1	23
03	23	2,1	0,05	21
04	21	2,75	0,1	21
05	56	2,82	0,1	23
06	35	2,5	0,1	25
07	35	2,6	0,1	25
08	49	2,73	0,15	30

Дополнительно были проведены измерения шероховатости пластин с пленкой SiO_2 на профилометре Talystep (ф. Taylor-Hobson) иглой с радиусом закругления $R=2\mu\text{м}$. Расчет шероховатости проводился усреднением по 50 точкам спектра с их измерением от базовой линии длиной 2мм. Шероховатость пленок не превышала 1нм.

На образце №08 были проведены исследования на Оже-спектрометре PHI 660 (Perkin Elmer) и получили распределение концентрации атомов O и Si (рис.2) в пленке SiO_2 по нормали z, направленной от поверхности к подложке, путем послойного распыления пленки с шагом 1nm ионами Ar^+ .

AES Profile V/f Alt. 8 Jun 12 Region: 2(O1) Area: 1 Sput Time: 2.30 min
File: 080612_3 SIO2
Scale: 0.067 kc/s Offset: 0.000 kc/s Ep: 3.00 kV Ip: 0.000e+00A

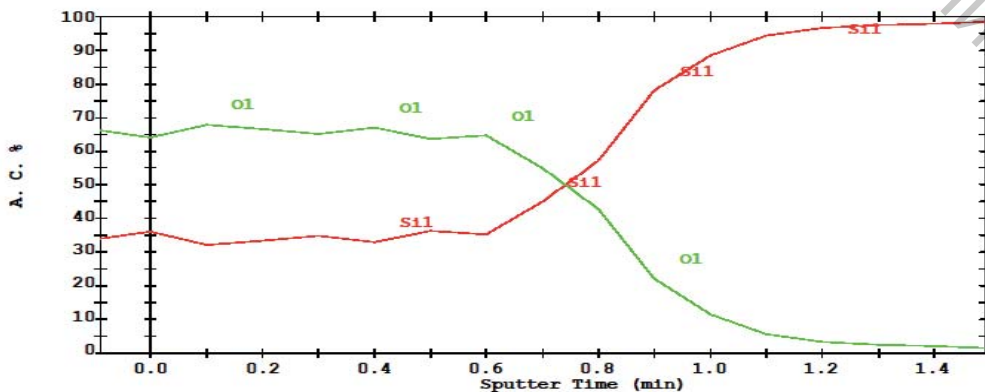


Рисунок 2 – Распределение атомов O и Si по толщине слоя SiO_2 образца №8.

Как видно из Оже - спектра, полученная пленка SiO₂ неоднородна по толщине. По полученным эллипсометрическим данным можно выделить пять подслоев с параметрами: шероховатый оксидный (SiO₂) с $\alpha_{z1} = -0.012 \text{ nm}$ и $n_2 = 1,46$, $k_2 = 0$; $d_2 = 3.9 \text{ nm}$; первый промежуточный с $\alpha_{z3} = -0.102 \text{ nm}$; переходный с $n_4 = 3,025$; $k_4 = 0,355$; $d_4 = 4,4 \text{ nm}$; второй промежуточный с $\alpha_{z5} = -0.089 \text{ nm}$; подложка с $n_6 = 3,865$; $k_6 = 0,023$, при суммарной толщине поверхностного слоя около 8,3 нм. Этот результат удовлетворительно согласуется с данными Оже-спектроскопии. Поверхностный слой толщиной 4 нм по стехиометрическому составу соответствует оксиду кремния SiO₂. Между этим слоем и подложкой находится переходной слой толщиной 4,5 нм. Параметры переходного слоя по оптическим характеристикам не соответствует известным фазам кремния aSi, pSi и cSi. Из-за структурной неоднородности переходного слоя его параметры n_4 и k_4 имеют смысл эффективных характеристик. На основании линейного приближения Бругемана (ВЕМА) слой между двумя промежуточными слоями соответственно с α_{z3} и α_{z5} состоит из кремниевых фаз aSi (60%), cSi (7%), и SiO₂ (33%).

Таким образом при расчетах пленок SiO₂ толщиной менее 10 нм необходимо учитывать переходной слой для адекватного отражения модели пленка - подложка.

Список использованных источников

1. Аззам, Р. Эллипсометрия и поляризованный свет / Р. Аззам, Н. Башара: перевод с англ. под ред. А.В. Ржанова, К.К. Свиташева. – М.: Изд-во «Мир», 1981. – 582 с.
2. Гриценко, В.А. Структура границ раздела кремний/оксид и нитрид/оксид // Успехи физических наук.-2009.-т. 179, №9.- с.921 – 930.

УДК 532.51

РАЗРАБОТКА И ИССЛЕДОВАНИЕ НАСАДКИ ДЛЯ МАССООБМЕННЫХ АППАРАТОВ

*Матвейко Н.П., зав. кафедрой, доц. Протасов С.К.,
доц. Боровик А.А.*

Белорусский государственный экономический университет

В химической промышленности все большее распространение получают массообменные аппараты насадочного типа. Они применяются для процессов абсорбции, ректификации, экстракции и химических реакций. Насадочные аппараты представляют собой цилиндрические вертикальные колонны, заполненные насадочными телами (насадкой). В качестве насадки используют различной формы пустотелые тела. Насадка должна обладать большой удельной поверхностью (поверхность насадки, отнесенная к ее единице объема), большим свободным объемом (доля пустот в единице объема) и низким гидравлическим сопротивлением. В насадочных колоннах применяют регулярную (правильно уложенную) и нерегулярную (засыпанную внавал) насадку.

В настоящее время все более широкое применение получают регулярные насадки, эффективность которых не меняется в зависимости от диаметра аппарата за счет правильной организации гидродинамического режима.

Авторами разработана и исследована новая конструкция регулярной насадки, которая представляет собой пакеты, набираемые из концентрических тонкостенных цилиндров, между которыми располагаются по всему периметру зигзагообразные ленты, образующие вертикальные каналы с поверхностью цилиндров. В процессе исследования определяли гидравлическое сопротивление насадки и эффективность взаимодействия фаз.

Исследования эффективности.

Эффективность взаимодействия фаз в насадке определяли при десорбции CO₂ из воды и при испарении воды.

Эффективность взаимодействия фаз при десорбции CO₂ оценивали по коэффициенту извлечения

$$\varphi = (x_n - x_k) / (x_n - x_k^*),$$

где x_n , x_k , x_k^* – соответственно содержание CO₂ в воде на входе, на выходе и равновесная на выходе из насадки.

Содержание CO₂ в воздухе, поступающем в насадку, принимали равным нулю, поэтому и $x_k^* = 0$.