

# ЭЛЛИПСОМЕТРИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ОСОБЕННОСТЕЙ ФОРМИРОВАНИЯ ПЛЕНОК $\text{HfO}_2$ НА ОПТИЧЕСКОМ СТЕКЛЕ

© 2009 г. В. А. Одарич, канд. физ.-мат. наук

Киевский университет им. Тараса Шевченко, Киев, Украина

E-mail: wladodarych@narod.ru

В спектральной области 314–632 нм проведены многоугловые эллипсометрические исследования пленок диоксида гафния толщиной 30–300 нм, нанесенных на оптическое стекло методом напыления материала электронным пучком. Обнаружено, что совокупность эллипсометрических данных можно описать в модели двухслойной отражательной системы. Найдены параметры системы. Внутренний слой является однородным, его показатель преломления в пределах погрешности процедуры вычисления одинаковый для всех исследованных образцов, а толщина растет в процессе напыления пленки. Внешний слой имеет меньший показатель преломления, чем внутренний, а его толщина для разных образцов изменяется в пределах 10–20 нм.

**Ключевые слова:** диоксид гафния, микроструктура пленки, однослойная модель, двух слойная модель

Коды OCIS: 240.0310, 240.2130

Поступила в редакцию 22.12.2008

В последние годы наблюдается большой интерес к диэлектрическим пленкам  $\text{HfO}_2$ , которые являются перспективным материалом для создания устройств опто- и микроэлектроники, барьерных слоев, просветляющих покрытий зеркал лазерных устройств, защитных покрытий, газовых и магнитных сенсоров.

Дефектность пленок препятствует их практическому применению, поэтому большое внимание уделяется исследованиям микроструктуры пленок и, соответственно, совершенствованию технологических условий их получения.

Значительный интерес представляют оптические свойства пленок  $\text{HfO}_2$ . Значения показателя преломления используются при расчетах покрытий, а спектр поглощения определяет область прозрачности, т. е. потери световой энергии. Показатели преломления, полученные разными авторами [1–10], меньше показателя преломления материала в массивном состоянии и обнаруживают значительный разброс в зависимости от метода и технологических условий нанесения.

В работах [2–6] такой разброс объясняется дефектностью пленок, их пористостью, отклонением от стехиометрии, полиморфностью, топографией поверхности и проч. Причиной такого разброса также может быть отклонение реальной модели отражательной системы от модели, выбранной при расчете экспериментальных данных. В работе [4] высказано предположение, что плотность пленки уменьшается от подложки к поверхности.

Авторами работ [11–13] на пленках  $\text{HfO}_2$  небольших толщин в модели однородной пленки получены значения показателя преломления, которые изменяются хаотически для пленок разной толщины.

В данной работе поставлена задача установить реальную модель отражательной системы пленок  $\text{HfO}_2$  и определить ее параметры, вычислив показатели преломления и толщины слоев.

## Объекты исследования и детали эксперимента

Пленки  $\text{HfO}_2$  получены на оптическом стекле К8 напылением материала электронным пучком. Пленки изготовлены на установке УВН-60 при давлении в камере 0,26 мПа. Перед нанесением пленок поверхность подложки обработана тлеющим разрядом в течение 2 мин при напряжении на высоковольтном электроде 4 кВ. Движение образцов – планетарное. Температура подложки 160 °C, ток луча 250 мА при ускоряющем напряжении 6 кВ. Толщина пленок контролировалась ультразвуковым толщиномером и находилась в пределах от 30 до 255–300 нм, погрешность данного метода может составлять 10–20%. Всего было исследовано 15 образцов. Толщина пленок была одинаковой по площади образцов, что диагностировалось одинаковым интерференционным цветом.

Эллипсометрические измерения выполнены на длине волны 632,8 нм с помощью лазерного

эллипсометра ЛЭФ-3М (угол падения  $\varphi = 60^\circ$ ) и на нескольких длинах волн в области 313–579 нм фотометрическим вариантом [14] метода Битти в широкой области углов падения в окрестности главного угла  $\Phi$  (угла падения, при котором  $\Delta = 90^\circ$ ). Измеряемыми величинами в данном методе являются эллипсометрические параметры  $\cos\Delta$  и  $\operatorname{tg}\psi$ , где  $\Delta$  – разность фаз между  $-p$  и  $-s$  проекциями электрического вектора световой волны, а  $\operatorname{tg}\psi$  – отношение коэффициентов отражения в  $-p$  и  $-s$  плоскостях образца. Из многоугловых измерений найден главный угол и эллипсометрический параметр  $\operatorname{tg}\psi$  на этом угле – эллиптичность.

## Результаты

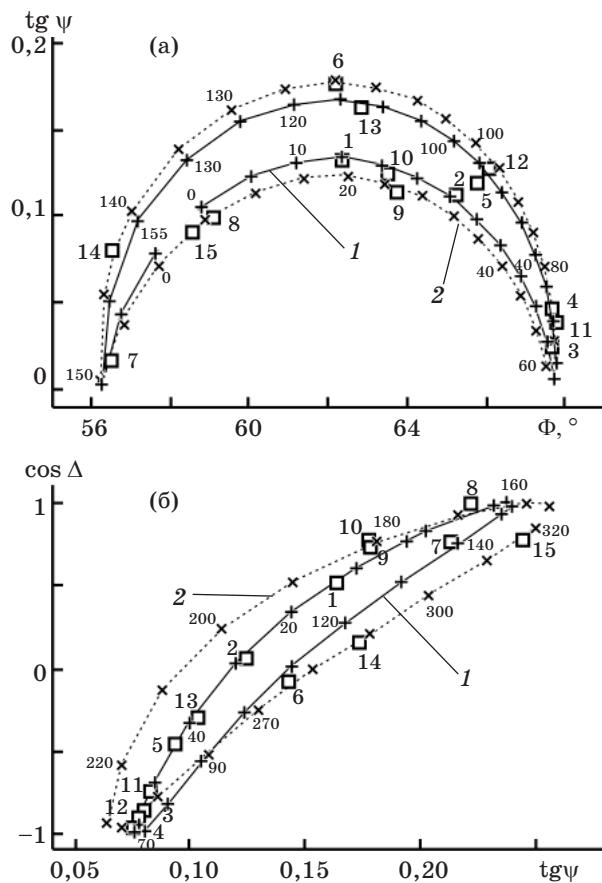
На рис. 1 на примере двух длин волн представлены экспериментальные точки, полученные для всех исследованных пленок.

Видно, что точки расположены на диаграмме главный угол – эллиптичность (рис. 1а) закономерно, образуя дугообразную кривую. Все они попадают в область углов падения от некоторого минимального угла, немного меньшего, чем угол Брюстера подложки, до некоторого максимального угла падения. На длине волн 632,8 нм (рис. 1б) экспериментальные точки разбросаны относительно кривой, подобной петле. Разброс экспериментальных точек относительно упомянутых кривых значительно больше погрешности измерения.

Интерпретация эллипсометрических измерений включает определение реальной модели отражательной системы, формирующей эллипсометрические параметры отраженной световой волны. Прежде всего была проверена выполнимость простейшей модели однородной пленки к исследованной системе образцов.

Значения показателя преломления  $n_1$  и толщины  $d_1$  пленки в модели однослоиной системы находились из основного уравнения эллипсометрии по измеренной паре эллипсометрических параметров  $\cos\Delta$  и  $\operatorname{tg}\psi$  (на лазерном эллипсометре) или  $\Phi$  и  $\operatorname{tg}\psi$  (на фотометрическом эллипсометре) с помощью автоматизированной итерационной процедуры [11]. При этом показатель преломления стекла  $n_3$  известен с большой точностью [15] – для контроля он проверялся с помощью рефрактометрического метода.

Важной особенностью полученных результатов является аномальное в рамках однослойной модели расположение некоторых экспериментальных точек на диаграмме измеренных ве-



**Рис. 1.** Экспериментальные значения эллипсометрических параметров  $\Phi$ ,  $\operatorname{tg}\psi$  и  $\cos\Delta$ ,  $\operatorname{tg}\psi$  (квадратики) для разных образцов (числа у квадратиков) на двух длинах волн 579 (а) и 632,8 нм (б) в сравнении с результатами вычислений в двухслойной модели (кривые 1 и 2). Параметры модели: (а)  $1 - n_1 = 1,91$ ,  $n_2 = 2$ ,  $d_1 = 18$  нм;  $2 - n_1 = 1,825$ ,  $n_2 = 2$ ,  $d_1 = 15$  нм; (б)  $1 - n_1 = 1,934$ ,  $n_2 = 2,003$ ,  $d_1 = 20$  нм;  $2 - n_1 = 1,876$ ,  $n_2 = 1,995$ ,  $d_1 = 27$  нм.

личин, проявляющееся в том, что показатели преломления, вычисленные для этих точек, не-правдоподобно отличаются от ожидаемых.

Так, для образцов 7 и 14 на рис. 1а значения  $\Phi$  и  $\operatorname{tg} \psi$  попадают в область диаграммы, которой отвечают главные углы падения, меньшие угла Брюстера подложки ( $\varphi_{\text{Бр}} = 56,6$  на  $\lambda = 579$  нм), и соответственно показатели преломления 1,4–1,2.

На рис. 1б экспериментальная точка 15 лежит далеко справа от точек остальных образцов и ей отвечает показатель преломления, больший 4.

Аналогичные аномалии размещения точек и связанные с ними аномальные значения показателей преломления, вычисленные в модели однослоиной системы, наблюдаются на других

длинах волн практически для всех образцов, причем, для каждого на одной или нескольких длинах волн.

Определенные аномалии проявляются также в многоугловых измерениях. Как пример, на рис. 2а и рис. 3а представлены результаты многоугловых измерений, проведенных на образце 14, для которого наблюдается аномальное расположение экспериментальной точки на диаграмме рис. 1а. Для других длин волн и других пленок наблюдаются такие же монотонные зависимости эллипсометрических параметров от угла падения, как и те, что на рис. 2а и рис. 3а.

На рис. 2б и 3б приведены показатели преломления пленки 14, вычисленные в модели однослойной системы. На  $\lambda = 579$  нм показатель преломления уменьшается от 1,33 до 1,12 в интервале углов падения  $7^\circ$ , а на  $\lambda = 405$  нм уменьшается еще больше – от 3,0 до 2,3 в интервале  $12^\circ$ .

Практически для всех исследованных образцов на определенных длинах волн, где значения главного угла близки к углу Брюстера, наблюда-

ются аномально большие или аномально малые значения показателя преломления относительно ожидаемых, а в многоугловых измерениях появляется зависимость показателя преломления от угла падения света на образец.

Отмеченные особенности экспериментальных результатов можно объяснить отклонением реальной модели отражательной системы от модели однослойной однородной системы. В частности, в однослойной модели не может реализоваться такая ситуация, когда, например, кривая постоянного показателя преломления (кривая ППП), которая отвечает показателю преломления, превышающему показатель преломления подложки, заходит при некоторых толщинах в область главных углов, меньших угла Брюстера подложки, как это наблюдается на образцах 7 и 14 (рис. 1а). Эта кривая начинается от угла Брюстера подложки и через половину периода возвращается к углу Брюстера, повторяя значения главного угла и эллиптичности первого полупериода [16].

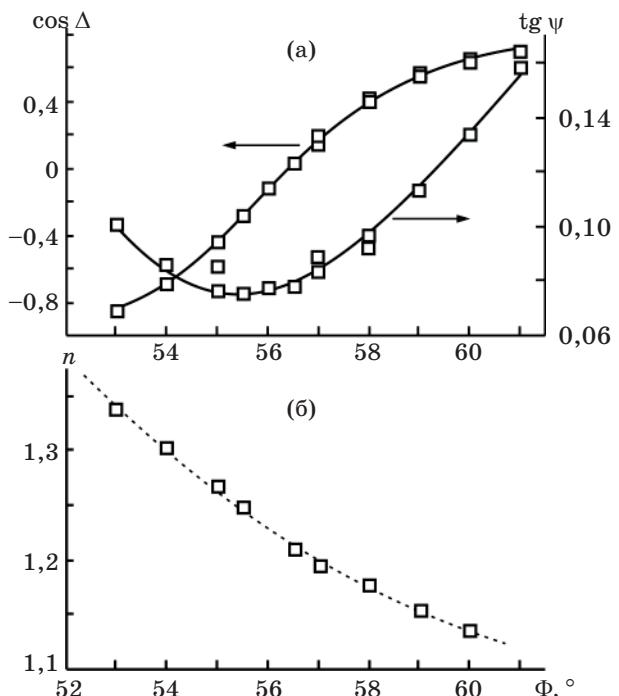


Рис. 2. Измеренные на длине волны 579 нм значения эллипсометрических параметров  $\cos\Delta$  и  $\operatorname{tg}\psi$  (а) для образца 14 (квадратики) в сравнении с вычислениями в двухслойной модели пленки (сплошные кривые), а также показатель преломления  $n$  пленки, вычисленный в однослойной модели (б). Параметры двухслойной системы приведены в табл. 1.

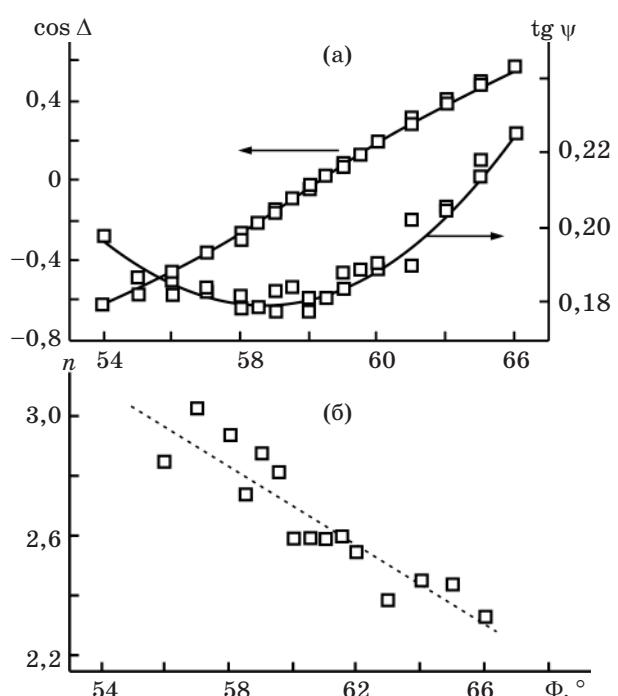


Рис. 3. Измеренные на длине волны 405 нм значения эллипсометрических параметров  $\cos\Delta$  и  $\operatorname{tg}\psi$  (а) для образца 14 (квадратики) в сравнении с вычислениями в двухслойной модели пленки (сплошные кривые), а также показатель преломления  $n$  пленки, вычисленный в однослойной модели (б). Параметры двухслойной системы приведены в табл. 1.

Модельные вычисления показали, что наблюдаемые экспериментальные факты можно объяснить в рамках двухслойной системы, у которой внешний слой является оптически менее плотным и более тонким, чем внутренний, причем в процессе напыления растет толщина внутреннего слоя.

Кривая ППП такой системы на диаграмме “главный угол – эллиптичность” начинается не от угла Брюстера, а от некоторой точки, которой отвечают постоянная толщина и показатель преломления внешнего слоя. С ростом толщины внутреннего слоя значения  $\Phi$  и  $\operatorname{tg}\psi$  описывают петлеобразную кривую, причем во втором полупериоде кривая ППП заходит в область углов падения, которые меньше угла Брюстера. Примеры таких теоретических кривых приведены на рис. 1.

Для определения показателей преломления  $n_2$  внутреннего и  $n_1$  внешнего слоев, а также их толщин  $d_2$  и  $d_1$  применен пакет итерационных программ [11] и специально разработанный графический метод [17].

В этом методе для каждой из пленок по измеренной паре эллипсометрических параметров для определенного значения  $n_2$  в окрестности ожидаемого рассчитываются посредством компьютерной программы [11] параметры внешнего слоя  $n_1$  и  $d_1$ , выбирая последовательный ряд толщин  $d_2$ . В результате на графике в координатах  $n_1 - d_1$  получают для каждой пленки определенную кривую (толщинную кривую), вдоль которой изменяется толщина  $d_2$ . Ясно, что толщинные кривые должны пересекаться в одной точке, которой будет соответствовать пара значений  $n_1$  и  $d_1$ , общая для всех пленок. Положение точки пересечения на каждой из кривых даст толщину  $d_2$  внутреннего слоя.

Из-за погрешностей точка пересечения всех толщинных кривых отсутствует, кривые пересекаются попарно, но существует область схождения кривых, в которой усреднением находят искомые параметры отражательной системы. Такая процедура оказалась успешной для всех исследованных пленок.

На рис. 4 для иллюстрации приведены толщинные кривые нескольких образцов 1, 2, 4, 7, 12 и 13 для значения показателя преломления  $n_2 = 2,0$ , когда наблюдается наилучшее схождение кривых в определенной области диаграммы. В частности на рис. 4 этой области отвечают показатель преломления внешнего слоя  $n_1 = 1,91$  и его толщина  $d_1 = 17$  нм.

Толщинные кривые образцов 6, 8, 9, 14 и 15 для длины волны 579 нм сходятся в другой об-

ласти диаграммы  $n_1 - d_1$ , определяя тем самым параметры слоев двухслойной системы для этих образцов:  $n_2 = 2, n_1 = 1,825, d_1 = 15$  нм.

На рис. 1а показаны кривые 1 и 2, вычисленные по найденным параметрам внутреннего и внешнего слоев. Вдоль каждой кривой увеличивается значение толщины внутреннего слоя. Видно, что экспериментальные точки достаточно хорошо укладываются на теоретические кривые.

На рис. 1б представлены теоретические кривые для длины волны 632,8 нм, найденные аналогично. Видно, что на теоретическую кривую 1 укладывается группа образцов 1, 2, 5, 7, 13, а на кривую 2 укладываются образцы 9, 14, 15. Причем кривой 1 соответствует оптически более плотный внешний слой, а кривой 2 – оптически менее плотный.

Некоторое несоответствие значений показателя преломления на этих двух длинах волн связано с погрешностью процедуры вычислений.

Для остальных образцов показатель преломления определяется аналогично.

В результате было установлено, что все исследованные образцы грубо можно разделить на две группы. Для обеих групп общим является значение показателя преломления внутреннего слоя ( $n_2 = 2$  на  $\lambda = 579$  нм), но эти группы различаются по показателям преломления внешнего слоя. В одной из них показатель преломления ближе к показателю преломления внутреннего

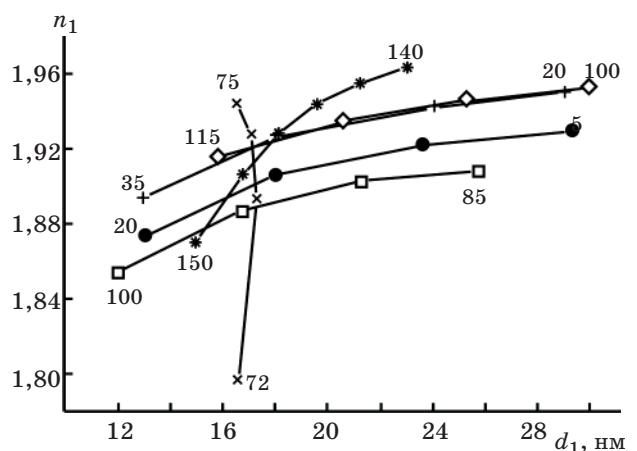


Рис. 4. Толщинные кривые для различных образцов на длине волны 579 нм. Цифры у засечек на кривых соответствуют толщине внутреннего слоя в нм.

**Таблица 1.** Параметры внешнего ( $n_1$ ,  $d_1$ ) и внутреннего ( $n_2$ ,  $d_2$ ) слоев, найденные из многоугловых измерений

$\lambda$ , нм	Образец 14				Образец 13			
	$n_2$	$d_2$ , нм	$n_1$	$d_1$ , нм	$n_2$	$d_2$ , нм	$n_1$	$d_1$ , нм
579	2,01	293	1,9	22	1,995	270	1,94	23
546	2,02	291	1,88	24	1,995	272	1,95	20
435	2,04	304	1,945	13	2,035	274	1,87	20
405	2,04	296	1,93	20	2,08	265	1,965	22,5
366	2,06	298	1,94	20	2,14	271	1,89	25

слоя (кривая 1,  $n_1 = 1,91$ ), в другой, напротив, дальше от него (кривая 2,  $n_1 = 1,825$ ).

Параметры слоев определялись так же из многоугловых измерений, преимуществом которых является то, что они позволяют находить неизвестные параметры отражательной системы из результатов измерений на одном образце.

Значения трех неизвестных параметров системы определялись по результатам многоугловых измерений с помощью метода толщинных кривых [17]. Эти кривые вычислялись теперь для нескольких углов падения экспериментальной кривой.

В табл. 1 приведены в качестве примера результаты обработки многоугловых измерений двух образцов. Видно, что практически на всех длинах волн показатель преломления внешнего слоя на пленке 14 больше отличается от показателя преломления внутреннего слоя, в отличие от образца 13, где показатель преломления внешнего слоя ближе к показателю преломления внутреннего слоя.

На рис. 2 и 3 представлены результаты вычисления угловых зависимостей эллипсометрических параметров на двух длинах волн для одного из образцов. Видно, что экспериментальные результаты достаточно хорошо описывает кривая, вычисленная на основе двухслойной модели с указанными значениями параметров.

Определение толщины внутреннего слоя каждой пленки имело свои особенности, обусловленные периодической зависимостью эллипсометрических параметров от толщины. Компьютерная программа определяла показатель преломления и наименьшую из всех возможных толщину  $d_0$ . Истинная толщина вычислялась по формуле

$$d_k = kd_{\Pi} + d_0, \quad (1)$$

где  $k$  – целое число, начиная с нуля, а  $d_{\Pi}$  – период, определяемый формулой

$$d_{\Pi} = \lambda / 2\sqrt{n^2 - \sin^2 \varphi}, \quad (2)$$

где  $n$  – показатель преломления пленки,  $\lambda$  – длина волны,  $\varphi$  – угол падения.

В качестве истинного выбирали такое значение толщины, которое в пределах статистического разброса было одинаковым на всех углах падения и на всех длинах волн. Его находили усреднением значений. Толщины слоев и их погрешности представлены в табл. 1 и 2.

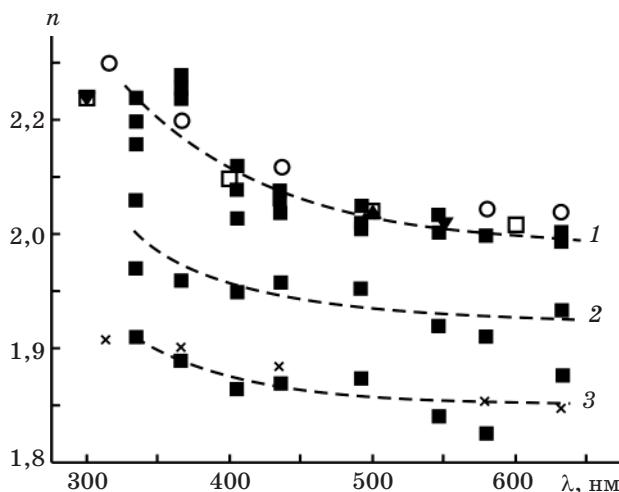
На рис. 5 показана дисперсия показателя преломления внешнего и внутреннего слоев в спектральной области данного исследования.

В результате было получено, что показатель преломления  $n_2$  внутреннего слоя пленки одинаковый для всех исследованных образцов и изменяется от 2,00 до 2,12 в спектральном интервале 350–632 нм. При этом толщина этого слоя растет от 11 до 315 нм.

Напротив, толщина и показатель преломления внешнего слоя изменяются от образца к образцу, в среднем его толщина составляет

**Таблица 2.** Толщины слоев пленок  $HfO_2$

Пленка	$d_1$ , нм	$d_2$ , нм
1	$20 \pm 1$	13
2	$20,5$	$29 \pm 1,5$
3	19	57
4	20	79
5	—	$118 \pm 2$
6	18	115
7	22	140
8	15	173
9	22	$180 \pm 3$
10	21	182
11	22	227
12	22	249
13	21	272
14	20	$297 \pm 3$
15	$21 \pm 1,5$	$316 \pm 3$



**Рис. 5.** Показатели преломления  $n$  внутреннего (1) и двух типов внешнего (2, 3) слоев в сравнении с литературными данными: ■ – данные автора, □ – [3], ▲ – [8], ▼ – [7], ○ – [9], \* – [10].

$20 \pm 5$  нм. Исследованные образцы можно грубо разделить на две группы. В одной из них показатель преломления внешнего слоя ближе всего по значению к показателю преломления внутреннего слоя и изменяется от 1,96 до 2,02 в спектральном интервале 350–632 нм. Другая группа образцов имеет показатель преломления внешнего слоя, изменяющийся от 1,84 до 1,90 в том же спектральном интервале.

### Обсуждение результатов

Результаты настоящей работы хорошо согласуются с имеющимися в литературе [4, 7, 8] представлениями о неоднородности пленок  $\text{HfO}_2$ . В частности, установлено, что показатель преломления пленок вблизи подложки больший, чем у ее внешней поверхности [4, 5]. В работе [1] высказано предположение, что градиент показателя преломления одинаков по всей толщине пленки, а в работе [5] оказалось невозможным в рамках погрешности эксперимента выбрать ту или иную модель неоднородности.

Определение реальной модели отражательной системы при обработке эллипсометрических измерений почти всегда представляет некоторую проблему. В данной работе обнаружено, что применение модели однослойной системы к пленкам  $\text{HfO}_2$  в одноугловых измерениях приводит к нереальным значениям показателя преломления, большим или меньшим, чем действительные. Многоугловые измерения выявляют зависи-

мость показателя преломления от угла падения. Такие отклонения от реальной отражательной системы проявляются наиболее ярко тогда, когда толщина пленки близка к периоду, т. е. когда измеренные значения эллипсометрических параметров близки к тем, которые относятся к подложке, свободной от пленки.

Применение эллипсометрии к большому массиву образцов разнотолщинных пленок позволило установить, что к их реальной структуре подходит двухслойная модель. В ней внешний слой имеет толщину и показатель преломления, индивидуальные для каждого образца, причем, последний меньше показателя преломления внутреннего слоя, который, наоборот, практически одинаков для всех исследованных пленок. Максимальная разность показателей преломления внутреннего и внешнего слоев, полученная в эксперименте, составляет около 0,15, что совпадает с данными работы [4].

Такая модель пленок отображает особенность структуры, образующейся при росте толщины пленки. Обнаружено [3, 18], что часто пленки растут в виде столбиков, вытянутых в направлении роста. Пустоты между столбиками уменьшают эффективный показатель преломления, как это показано в работе [19] на примере пленок  $\text{ZnS}$ , где рассчитан показатель преломления смеси двух диэлектриков – совокупности столбиков и межстолбниковых промежутков.

Рассматриваемый в данной работе внутренний слой можно представить как слой  $\text{HfO}_2$ , содержащий замкнутые пустоты. Плотно упакованная столбиковая цилиндрическая структура имеет плотность упаковки приблизительно 0,9 [18]. Если принять для показателя преломления  $\text{HfO}_2$  в массивной форме значение 2,11–2,15 [6, 7], то такой слой будет иметь показатель преломления 1,95–1,98 согласно формуле Лорентц–Лоренца. Полученное в данной работе значение показателя преломления 2,0 (для длины волны 579 нм) больше, что может свидетельствовать о нарушении совершенной столбиковой структуры исследованных пленок.

Спектры показателя преломления внутреннего слоя в настоящей работе хорошо совпадают с данными работ [3, 7–9], которые были получены на плотно упакованных пленках (кривая 1 на рис. 5).

На поверхность пленки выходят вершины столбиков, где доля пустот выше и значения показателя преломления вблизи поверхности меньше, чем в глубине. Следовательно, исследованный в данной работе внешний слой – это

шероховатая поверхность пленки  $\text{HfO}_2$ , образованная вершинами столбиков, сужающихся к внешней поверхности.

Хорошо известно, что в эллипсометрических измерениях при относительно небольшой шероховатости с высотами, значительно меньшими длины волны, ее можно описать эквивалентным слоем с соответствующими параметрами. При этом толщина внешнего слоя может трактоваться как высота шероховатости, которая является индивидуальной для каждого исследованного в работе образца, и изменяется в пределах 10–20 нм.

Спектры показателя преломления внутреннего слоя, как видно из данных, представленных на рис. 5 (кривая 3), хорошо совпадают с данными работ [3, 7–9], полученными на пленках с аморфной структурой. Разброс значений показателя преломления, наблюдаемый во многих работах, очевидно обусловлен разной структурой приповерхностной области пленок, а также отмеченным выше влиянием неправильного выбора модели отражательной системы.

## Выводы

Обнаружено, что эллипсометрические данные, полученные на образцах пленок диоксида гафния разной толщины, описываются моделью двухслойной отражательной системы. Внешний слой имеет меньший показатель преломления, чем внутренний, а его толщина изменяется на разных образцах и находится в пределах 10–20 нм. Внутренний слой является однородным, его показатель преломления в пределах погрешности процедуры вычисления одинаковый для всех исследованных образцов, а толщина растет в процессе нанесения пленки.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Bogorno J.P., Lazarides B., Pelletier E. The automatic determination of optical constants of inhomogeneous thin films // Appl. Opt. 1982. V. 21. № 22. P. 4020–4029.
2. Martin P.J., Netterfield R.P. Optimization of deposition parameters in ion-assisted deposition films // Thin Solid Films. 1991. V. 199. № 2. P. 351–358.
3. Edlou S.M., Smajkelwicz A., Al-Jumaily G.A. Optical properties and environmental stability of oxide coatings, deposited by reactive sputtering // Appl. Opt. 1993. V. 32. № 28. P. 5601–5605.
4. Reicher D., Black P., Jungling K. Defects formation in hafnium oxide thin films // Appl. Opt. 2000. V. 39. № 10. P. 1589–1599.
5. Al-Kuhaili M.F., Durrani S.M.A., Khavaja E.E. Study of hafnium oxide thin films, produced by the electron-beam deposition // J. Phys. D. 2004. V. 37. № 8. P. 1254–1261.
6. Al-Kuhaili M.F. Optical properties of hafnium oxide thin films and their application in energy-efficient windows. // Opt. Mat. 2004. V. 27. № 3. P. 383–387.
7. Lehan J.P., Vao Y., Bovard B.G., Macleod M.A. Optical and microstructural properties of  $\text{HfO}_2$  // Thin Solid Films. 1991. V. 203. № 2. P. 227–250.
8. Dewei Zhang, Shuhai Fan, Yuanan Zhao, Weidong Gao, Jianda Shao, Ruiying Fan, Yingjian Wang, Zhengxiu Fan. High laser-induced damage threshold  $\text{HfO}_2$  films prepared by ion-assisted electron beam evaporation // Appl. Surface Sci. 2005. V. 243. № 1. P. 232–237.
9. Modreanu M., Sancho-Parramon J., O'Connell D., Justice J., Durand O., Servet B. Solid phase crystallisation of  $\text{HfO}_2$  thin films // Mat. Sci. and Eng. 2005. V. B118. № 1. P. 127–131.
10. Conley J.F., Jr., Ono Y., Tweet D.J., Zhuang W., Solanki R. Atomic layer deposition of thin hafnium oxide films using a carbon free precursor // J. Appl. Phys. 2003. V. 93. № 1. P. 712–718.
11. Одарич В.А., Панасюк В.Й., Сташук В.С. Спектроэллипсометрические исследования показателя преломления и толщины слоев  $\text{HfO}_2$  на оптическом стекле // ЖПС. 1992. Т. 56. № 5–6. С. 827–830.
12. Одарич В.А. Еліпсометричні дослідження шарів  $\text{HfO}_2$ ,  $\text{SiO}_2$  та  $\text{Al}_2\text{O}_3$  на кварцовому склі // Укр. фіз. ж. 2000. Т. 45. № 1. С. 44–49.
13. Odarych W.A. Determination of the surface region structure from ellipsometric data // Functional Materials. 2000. V. 7. № 3. P. 475–479.
14. Одарич В.А. Измерение малых величин эллипсометрических параметров // Завод. лаборатория. 1970. Т. 43. № 9. С. 1093–1095.
15. ГОСТ 13659-68. Стекло оптическое бесцветное. Физ.-хим. свойства. М.: изд-во стандартов, 1968. 60 с.
16. Одарич В.А., Москаленко Т.П., Ципенюк Р.С. Визначення параметрів відбиваючої системи методом еліпсометрії головного кута. Пряма задача еліпсометрії // Вісник КУ. Фіз.-мат. н. 1991. Вип. 2. С. 73–78.
17. Вуйчик М.В., Євменова А.З., Одарич В.А., Сизов Ф.Ф. Еліпсометричні дослідження плівок  $\text{CdTe}$  на  $\text{CdHgTe}$  // Фізика і хімія твердого тіла. Physics and Chemistry of Solids State. 2007. Т. 8. № 2. С. 296–300.
18. Harris M., Macleod H.A., Ogura S., Pelletier E., Vidal B. The relationship between optical inhomogeneity and film structure // Thin Solid Films. 1979. V. 57. № 1. P. 173–178.
19. Harris M., Bowden M., Macleod H.A. Refractive index variations in dielectric films having columnar microstructure // Opt. Com. 1984. V. 51. № 1. P. 29–32.