

ЭЛЛИПСОМЕТРИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ПОВЕРХНОСТНОГО СЛОЯ ПОЛИРОВАННОГО ОПТИЧЕСКОГО СТЕКЛА

© 2008 г. В. А. Одарич, канд. физ.-мат. наук

Киевский университет имени Тараса Шевченко, г. Киев, Украина

E-mail: wladodarych@narod.ru

Проведены эллипсометрические исследования свойств поверхностного слоя, который возникает при длительном механическом полировании оптического стекла марки К8. Установлено, что при относительно непродолжительном полировании стекла к полированному слою можно применить модель однородного диэлектрического слоя; определены параметры слоя – показатель преломления и толщина. Показатель преломления слоя несколько меньше показателя преломления ненарушенного стекла, а толщина изменяется в пределах 200–700 нм в зависимости от длительности полирования. На глубоко полированных образцах выявлены проявления неоднородности полированного стекла, которые можно описать переходным слоем на внешней границе полированного слоя толщиной около 50 нм.

Коды OCIS: 240.4350, 240.5450.

Поступила в редакцию 11.07.2007.

Исследование свойств нарушенного слоя, который возникает при абразивной обработке материалов, является актуальной задачей при разработке устройств микро- и оптоэлектроники. В частности, оптическое стекло и полупроводниковые материалы часто используются как подложки для нанесения пленочных элементов, наноструктурных образований и т. п. В этом случае структурные особенности прилегающих слоев подложки могут существенно влиять на рабочие характеристики пленочных элементов.

Установлено [1–5], что эллипсометрические параметры (главный угол падения и эллиптичность отраженного света) изменяются с увеличением глубины полирования оптических стекол, приближаясь к тем значениям (соответственно угла Брюстера и нуля), которые характеризуют ненарушенный материал. Однако даже при глубоком полировании для каждого стекла наблюдаются остаточная эллиптичность и смещение главного угла относительно угла Брюстера.

В отмеченных работах такое поведение поляризационных параметров отраженного света объясняется уменьшением толщины трещиноватого слоя, наведенного предыдущим шлифованием грубым абразивом. Наличие остаточной эллиптичности при глубоком полировании может свидетельствовать об образовании вблизи поверхности материала полированного слоя.

О существовании полированного слоя известно давно. В частности, были попытки [6–16] определения в модели однородного слоя его параметров – показателя преломления и толщины, однако существующая информация по данному вопросу противоречива. Так, толщины полированного слоя (несколько десятков нанометров) на оптических стек-

лах являются заниженными, несоизмеримо меньшими размера зерен полировального абразива (1 мкм). Показатель преломления слоя получают как большим, так и меньшим показателя преломления ненарушенного материала. Вопрос о применимости модели однородного слоя к полированным слоям хотя и ставился [9, 15], но к данному времени остается нерешенным.

Исследования свойств нарушенного слоя не прекращаются, в частности, в последние годы проведены эллипсометрические исследования слоев вблизи поверхности кремниевых пластин [17], пористых пленок [18, 19].

Целью данной работы были проверка возможности применения модели однослойной однородной системы к приповерхностному слою полированного стекла и определение показателя преломления и толщины слоя.

Аппаратура и объект исследования

Объектом исследования были четыре образца оптического стекла марки К8, полученные стандартной технологией механической обработки деталей, которая применяется на предприятиях оптического приборостроения. Первичная обработка, включавшая шлифовку заготовок, осуществлялась алмазной пастой с размером зерна 28 мкм. Полировка образцов выполнена полированием полиритом с размером зерна менее 1 мкм на контролируемую глубину 20, 30 и 50 мкм. Исследована также юстировочная пластина, которая поставляется к прибору ЛЭФ-3М как пример глубоко полированного стекла, с которого полированием снят слой материала толщиной, превышающей 50 мкм.

Эллипсометрические углы Δ и ψ измеряли на длине волны 632,8 нм посредством компенсаторного лазерного эллипсометра ЛЭФ-3М, значения $\cos\Delta$, $\operatorname{tg}\psi$ на нескольких длинах волн спектра излучения ртутной лампы – нестандартным фотометрическим эллипсометром, калиброванным с помощью пластины монокристаллического кремния. Измерения выполнялись в области углов падения по обе стороны от угла Брюстера материала (6–7 углов), где эллипсометрическая функция изменяется наиболее резко, захватывая почти всю область своих значений.

Для всех образцов многоугольные измерения повторяли не менее четырех раз, каждый раз заново устанавливая образец, юстируя установку и следя за тем, чтобы зондирующий световой пучок засвечивал на поверхности образца участок вблизи центра размером 2–4 мм.

Результаты

При исследовании таких малоконтрастных объектов, как полированный слой, важное значение приобретает учет погрешностей измерения. В этом случае функция Δ очень быстро изменяется в интервале углов падения $\pm(20'-30')$ относительно угла Брюстера, а функция ψ достигает малых значений (порядка 10^{-3}) вблизи него.

Зависимости эллипсометрических параметров от угла падения, полученные в разных измерениях для одного и того же образца, сдвинуты как целое относительно друг друга на $2'-3'$. Это обстоятельство обусловлено совокупным действием погрешностей установки угла падения, смещением рабочего пучка по площади образца и неоднородностью свойств поверхности исследованных образцов. Эллипсометрические параметры на каждом угле падения усреднены, и в результате для каждого образца получены эллипсометрические кривые, которые характеризуют приповерхностную область вблизи центра. Полученные при этом погрешности $\delta(\cos\Delta) = \pm(0,001-0,05)$, $\delta(\operatorname{tg}\psi) = \pm(0,0001-0,001)$ зависят от угла падения и примерно одинаковы для обоих методов.

Для интерпретации эллипсометрических измерений часто используют программы обработки многоугольных измерений, например [18], с помощью которых методом поиска находят более чем два неизвестных параметра отражающей системы.

В нашем случае прозрачной системы, когда определению подлежат два ее параметра – показатель преломления n и толщина d приповерхностного слоя, не было необходимости в применении такой процедуры, поскольку по двум эллипсометрическим параметрам, измеренным на каждом угле падения,

всегда можно определить две неизвестные характеристики системы. С этой целью мы применили автоматизированную программу [20], основанную на итерационной процедуре решения двух уравнений для действительной и мнимой частей уравнения эллипсометрии. Суть алгоритма состоит в том, что, исходя из начальных приближительных значений, в процессе итерирования программа находит такие значения определяемых параметров, в частности, n и d , при которых вычисленные на их основе эллипсометрические параметры совпадают с измеренными с любой точностью (в данном случае до 0,0001), после чего следует останов и вывод результатов. Значения показателя преломления находятся данной итерационной процедурой с погрешностью не выше 0,001, а толщины – до 0,1 нм.

При этом мы использовали показатели преломления подложки – оптического стекла К8, хорошо известные для всех рабочих длин волн [21]. Для контроля показатель преломления образцов был измерен рефрактометрическим методом и совпадал с приведенным в стандарте с точностью до 0,001 (погрешность рефрактометрического метода).

Примененная процедура является однозначной, в ней исключено появление ложных решений, как это часто бывает при определении более чем двух неизвестных методами поиска минимума функций рассогласования. Общая погрешность параметров приповерхностного слоя, обусловленная приведенными выше значениями погрешностей измерения эллипсометрических параметров, составляет

$$\Delta n_1 = \pm(0,002 - 0,006), \quad \Delta d = \pm 5 \text{ нм.}$$

Известно, что эллипсометрические параметры прозрачной однородной системы являются периодическими функциями толщины с периодом, зависящим от угла падения φ

$$d_n = \lambda / \left(2\sqrt{n^2 - \sin^2\varphi} \right), \quad (1)$$

где n – показатель преломления слоя, λ – длина световой волны. Значение периода составляет 100–200 нм в зависимости от показателя преломления и длины волны. Программа вычисления выдавала показатель преломления и наименьшее из всех возможных значение толщины d_1 . Истинное значение толщины определяли с помощью изложенной ниже процедуры.

На рис. 1 и 2 приведены значения показателя преломления и первой толщины полированного слоя, вычисленные на разных углах падения по измеренным эллипсометрическим параметрам. Видно (рис. 1), что в пределах статистического разброса, который не превышает нескольких единиц четвертого знака после запятой, показатель прелом-

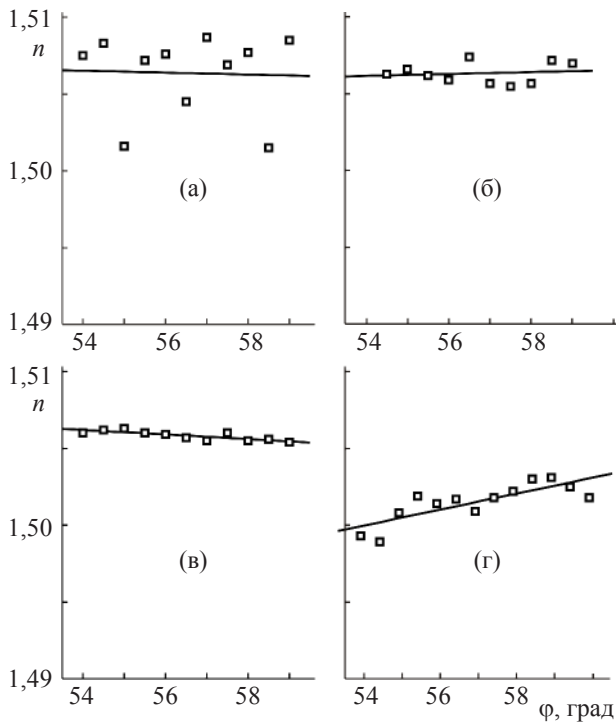


Рис. 1. Значения показателя преломления n полированного слоя, вычисленные по измеренным эллипсометрическим параметрам на разных углах падения φ . Глубина полирования образцов (толщина слоя, снятого полированием): а – 20, б – 30, в – 50, г – больше 50 мкм (юстировочная пластина).

ления остается неизменным на всех углах падения для образцов с глубиной полирования 20 и 30 мкм (рис. 1а, 1б). Для образца с глубиной полирования 50 мкм (рис. 1в) и для юстировочной пластины (рис. 1г), где глубина полирования еще больше, наблюдается некоторая зависимость вычисленных значений показателя преломления от условий эксперимента – угла падения световой волны на исследованный образец, но эта зависимость совсем небольшая – несколько тысячных долей.

Независимость показателя преломления от угла падения означает, что примененная для расчета модель системы (прозрачный слой на прозрачной подложке) совпадает с моделью исследованной системы, а значит, полированный слой вблизи поверхности оптического стекла можно с достаточной точностью считать однородным слоем без поглощения.

Напротив, для всех образцов наблюдается ощутимая зависимость первого значения толщины от угла падения (рис. 2): в одних случаях толщина уменьшается (рис. 2а, 2в), в других (рис. 2б, 2г) – она растет с ростом угла падения.

Зависимость первой толщины от угла падения означает, что это значение не является настоящей толщиной полированного слоя.

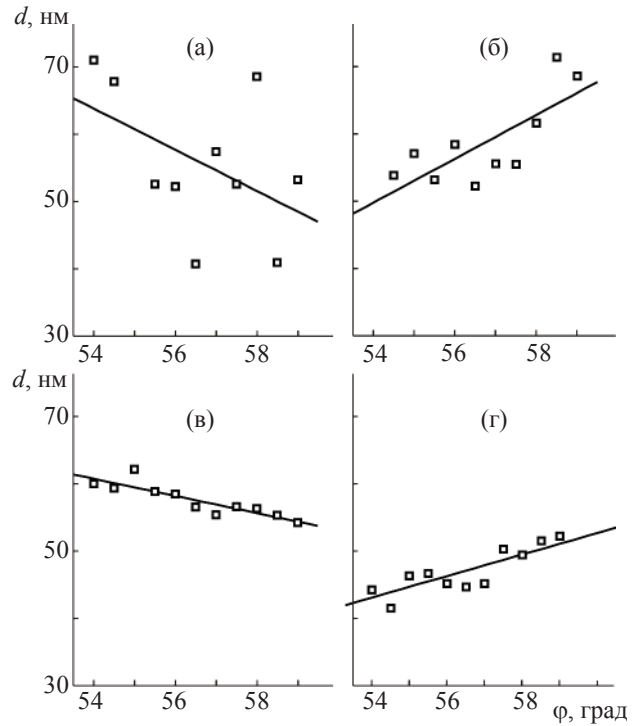


Рис. 2. Наименьшие возможные значения толщины d полированного слоя, полученные из эллипсометрических измерений на разных углах падения φ . Обозначения образцов (а–г) те же, что и на рис. 1.

Действительно, настоящее значение толщины должно быть одинаковым (в пределах статистического разброса) на всех углах падения и на всех длинах волн. Если машинная программа нашла первое значение толщины d_1 , то остальные возможные толщины можно вычислить по формуле

$$d_k = kd_n \pm d_1, \quad (2)$$

где k – целое число, начиная с нуля, а d_n – период, определяемый формулой (1).

В [19] предложено устранять неоднозначность определения толщины путем применения поискового алгоритма минимизации функции ошибки [18]. Поскольку в случае малоконтрастного полированного слоя применение такой процедуры затруднительно, мы специально разработали простой однозначный метод нахождения истинной толщины, изложенный ниже.

Угловая зависимость первого значения толщины, если оно не является настоящей толщиной, определяется зависимостью периода от угла падения, которая описывается выражением (1), а также тем, в каком периоде лежит действительная толщина, т. е. значением k и знаком в (2). Действительно, из (1) видно, что с ростом угла падения период d_n всегда увеличивается. Тогда, если какое-то d_k является дей-

Таблица 1. Показатель преломления n и толщина d полированного слоя образцов с разной обработкой поверхности

Образец l , мкм	n	Δn	d , нм
20	1,5064	0,0008	560, 813
30	1,5064	0,0002	447, 698
50	1,5053	0,0001	310
Юстировочная пластина	1,50–1,5035		207

Примечание. l – толщина слоя, снятого полированием.

ствительной толщиной, то наименьшая толщина d_1 должна уменьшаться (знак плюс в (2), настоящая толщина лежит в начале периода) или увеличиваться (знак минус в (2), настоящая толщина лежит в конце периода) на величину, которая в k раз больше изменения периода в том же интервале углов падения.

Следовательно, полученные нами данные свидетельствуют, что в случае образцов рис. 2а и 2в действительная толщина лежит в начале, а для образцов рис. 2б и юстировочной пластинки (рис. 2г) – в конце k -го периода. Действительную толщину легко получить, рассчитав ряды возможных толщин для всех рабочих углов падения по формулам (1) и (2) или найдя номер k решения по формуле

$$k = \pm \Delta d_1 / \Delta d_n,$$

где Δd_1 – изменение первого значения толщины, а Δd_n – изменение периода в одном и том же интервале углов падения. (Эту формулу легко получить из (2).) Такие значения толщины, не зависящие от угла падения, были найдены, и результаты вычислений приведены в табл. 1.

Обнаружено, что показатель преломления полированного слоя всегда меньше показателя преломления подложки (1,51474 на длине волны 632,8 нм). С увеличением глубины полирования показатель преломления полированного слоя удаляется от показателя преломления ненарушенного стекла, а при глубоком полировании (юстировочная пластинка)

он начинает зависеть от угла падения, что свидетельствует о формировании неоднородного слоя.

Для двух первых образцов наблюдаются (см. табл. 1) два возможных значения толщины, которые принадлежат к смежным периодам. Одно из них уменьшается, другое, наоборот, увеличивается с ростом угла падения на несколько нанометров. Два возможных значения толщины обусловлены погрешностью измерения, особенно систематической погрешностью установки угла падения. На данном этапе нет возможности различить, какое из них является истинным, однако можно сделать общий вывод, что с увеличением глубины полирования от 20 до 50 мкм толщина полированного слоя уменьшается от 500–800 до 200 нм.

Эллипсометрические измерения на других длинах волн, выполненные на нестандартном спектроэллипсометре, позволили определить дисперсию показателя преломления полированного слоя. Полученные многократным повторением измерений угловые зависимости эллипсометрических параметров были усреднены, и найдены так называемый главный угол падения Φ , на котором измеряемая разность фаз между p - и s -компонентами электрического вектора световой волны равна 90° , а также отношение коэффициентов отражения на этом угле – эллиптичность ($\text{tg}\psi$). Преимуществом применения главного угла при обсчете эллипсометрических данных является то, что вблизи этого угла падения эллипсометрическая функция наиболее чувствительна к нарушениям поверхности. Вычисление параметров слоя выполняли по тем же программам, что и на произвольном угле падения, по значениям главного угла и эллиптичности. В частности, на каждой длине волны по формулам (1) и (2) вычисляли ряды возможных толщин. Результаты расчета параметров полированного слоя на образце с глубиной полирования 30 мкм приведены в табл. 2.

Трудно ожидать, что результаты измерений, проведенных на спектроэллипсометре, во всех деталях будут согласовываться с данными, полученными на лазерном эллипсометре, поскольку погрешность установки угла падения на спектроэллипсометре

Таблица 2. Результаты измеренных на разных длинах волн и рассчитанных параметров полированного слоя на образце с глубиной полирования 30 мкм

λ , нм	Φ , град	$\text{tg}\psi$	n	d_1	d_2	d_3	d_4	d_5	d_6	d_7	d_8
632,8	56,45	0,0039	1,5064	56	196	308	448	560	700	812	952
579	56,456	0,0069	1,5004	40	192	272	424	504	656	736	888
546	56,491	0,0072	1,5003	35	184	254	403	473	622	691	840
435	56,637	0,0085	1,5017	23	151	198	326	372	501	547	675
405	56,671	0,0090	1,5059	24	138	186	300	463	510	625	672

Примечание. Толщина слоя d_i выражена в нанометрах.

(3') была несколько выше, чем на приборе ЛЭФ-3М (1'), и неколлимированность рабочего светового пучка также была разной. Кроме того, измерения на спектроэллипсометре выполнены на одном и том же участке образца, а в случае лазерного эллипсометра участок был иным. Именно этим мы объясняем тот факт, что показатель преломления полированного слоя, полученный из измерений на лазерном эллипсометре, заметно отличается от показателей преломления, измеренных на спектроэллипсометре (см. табл. 2).

За истинное значение толщины необходимо принять то из возможных, которое в пределах определенного разброса одинаковое для всех длин волн. В табл. 2 отмечены эти самые вероятные значения. Видно, что в пределах достигнутой точности эксперимента можно выделить два возможных значения толщины полированного слоя: 191 ± 3 и 679 ± 8 нм. Считаем более вероятным второе значение, поскольку оно лучше согласуется со значением 698 нм, полученным из анализа многоугловых измерений на длине волны 632 нм (см. табл. 1).

Обсуждение результатов

В известной нам литературе вопрос об однородности полированного слоя почти не дискутировался, но теория однородного слоя применялась для определения его параметров. В [9] для анализа эллипсометрических данных, полученных на оптическом стекле К108, применены модели как однородного, так и неоднородного слоев с заданным профилем показателя преломления. Показано, что обе модели дают близкие результаты при глубоком полировании. В [15], напротив, утверждается, что модель однородного слоя может приводить к значительным погрешностям в оценке оптических характеристик полированного слоя вблизи поверхности свинцово-силикатного стекла ТФ10. Наконец, имеются данные [14], что показатель преломления полированного кварца уменьшается с глубиной, достигая объемного¹ значения на глубинах приблизительно 200 нм.

Представленные в данной работе данные не противоречат литературным и свидетельствуют, что в ряде случаев при механическом полировании оптического стекла вблизи его поверхности может образовываться однородный полированный слой, причем степень однородности слоя зависит от материала подложки и условий обработки. В частности, полированный слой можно с достаточной уверенностью считать однородным при толщинах снятого полированием слоя, не превышающих 30 мкм. Этот

¹ Имеется в виду значение показателя преломления внутри образца, т. е. показатель преломления стекла, не нарушенного обработкой, ненарушенного стекла.

вывод вытекает из того, что полированный слой при последовательном применении теории однородного слоя оказалось возможным описать параметрами (показателем преломления и толщиной), которые не зависят от условий эксперимента – угла падения светового пучка на объект исследования.

В частности, значения показателя преломления полированного слоя (см. табл. 1) 1,505–1,506 в пределах статистического разброса 0,0001–0,0008 не зависят от угла падения.

Можно также утверждать, что механическая полировка исследованных образцов привела к уменьшению показателя преломления стекла – абсолютные значения показателя преломления меньше показателя преломления ненарушенного стекла (1,51474) на 0,009, что превышает погрешность его измерения 0,002–0,006, приведенную выше.

До последнего времени считалось, что толщина полированного слоя на оптическом стекле лежит в пределах 10–100 нм [6–16]. Ее определение проводили в модели однородного слоя из эллипсометрических измерений при одном угле падения и на одной длине световой волны. При этих условиях в результате периодической зависимости эллипсометрических параметров от толщины слоя ее значения можно определить лишь с точностью до периода. Приведенные выше [6–16] значения толщины являются малыми, поэтому мы считаем, что они принадлежат к наименьшей толщине из ряда возможных для измеренной пары эллипсометрических параметров.

Последовательное применение теории однородного слоя позволило получить более реалистичные значения толщины полированного слоя, коррелирующие со степенью обработки поверхности и лежащие в пределах 200–700 нм, как это показано выше.

Однако на глубоко полированных образцах наблюдается хоть и небольшая, но заметная зависимость показателя преломления от угла падения, чего не должно быть в модели однородного слоя.

Одной из причин угловой зависимости показателя преломления может быть систематическая погрешность установки угла падения по лимбу эллипсометра. Для проверки этой гипотезы в интервале углов падения данного исследования выполнены модельные расчеты эллипсометрических параметров однослойной системы с определенными характеристиками (оптическими постоянными сред и толщиной слоя). Затем была внесена небольшая погрешность угла падения и по вычисленным значениям эллипсометрических параметров найдены показатель преломления и толщина слоя на каждом из углов падения данного диапазона.

На рис. 3 приведены результаты модельных вычислений, выполненных для систематического за-

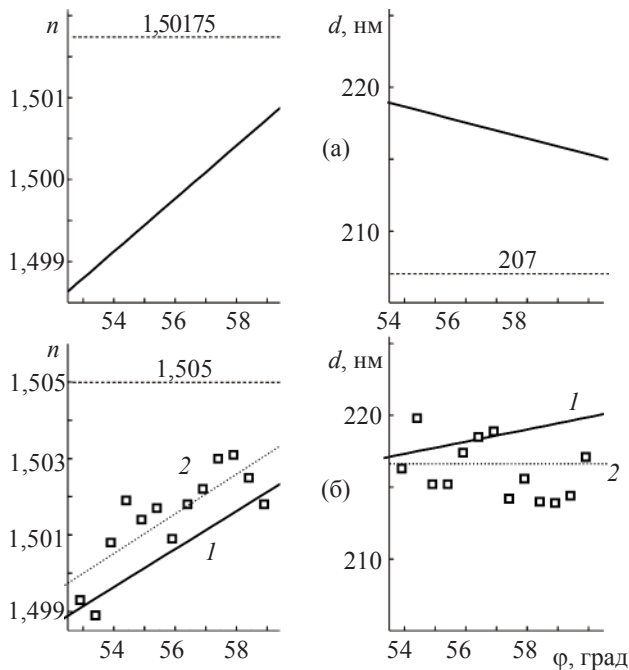


Рис. 3. Результаты модельных вычислений: а – влияние погрешности угла падения $\Delta\phi = 2'$ на значения показателя преломления n и толщины d слоя, найденные по эллипсометрическим параметрам на разных углах падения ϕ ; б – сравнение теоретических (1) значений показателя преломления n и толщины d эквивалентного слоя, который заменяет реальную двухслойную систему, с экспериментальными данными (2) для полированного слоя. Зависимость 1 рассчитана на основе параметров двухслойной системы, указанных в (3).

вышения угла падения на $2'$. Видно, что вместо истинного значения показателя преломления 1,50175 получаем показатель преломления, который растет от 1,4988 до 1,50025 в интервале углов падения 54° – 60° . Толщина слоя, напротив, уменьшается от 219 до 215 нм, тогда как ее настоящее значение равно 207 нм.

Следовательно, систематическая погрешность установки угла падения заметно изменяет абсолютные значения показателя преломления и толщины слоя и создает угловые зависимости этих величин в процессе обсчета эллипсометрических данных.

Наблюдаемые в данной работе угловые зависимости показателя преломления можно объяснить инструментальной погрешностью установки угла падения в пределах $5'$. При введении такой поправки на угол падения угловая зависимость показателя преломления выпрямляется и показатель преломления выходит на постоянное значение $1,500 \pm 0,001$, а толщина слоя составляет 212 ± 1 нм. Однако мы считаем, что такая погрешность установки угла па-

дения является маловероятной, поскольку ее значение в приборе ЛЭФ-3М не превышает $1'$.

Другой причиной зависимости параметров слоя от условий эксперимента может быть неоднородность реального полированного слоя, например, существование переходных слоев вблизи внешней или внутренней поверхности полированного слоя. Мы проверили эту гипотезу с помощью модельных расчетов, подобных изложенным выше.

В двухслойной модели с характеристиками, близкими к тем, которые получили в данном эксперименте, были рассчитаны эллипсометрические параметры в рабочем интервале углов падения. Затем по этим параметрам как аналогам экспериментальных данных вычислили показатель преломления эквивалентной пленки, которая заменяет реальную двухслойную систему.

Проведенными модельными расчетами установлено, что если не учитывать переходный слой при обсчете эллипсометрических данных, полученных на структуре, где такой слой есть, действительно возникают угловые зависимости показателя преломления и толщины эквивалентного однородного слоя. В частности, рост показателя преломления на 0,0035 в интервале 54° – 60° , который наблюдается на глубоко полированных образцах стекла, можно объяснить существованием промежуточного слоя, например, вблизи внешней поверхности этого слоя.

Мы нашли соответствующие параметры двух слоев, которые создают такой рост показателя преломления эквивалентного слоя в однослойной модели:

$$n_1 = 1,4925, d_1 = 49 \text{ нм}; n_2 = 1,505, d_2 = 209 \text{ нм}. \quad (3)$$

Сравнение результатов модельного расчета с экспериментальными данными показано на рис. 3б. Видно, что вместо истинного значения показателя преломления 1,505, неизменного на всех углах падения, получаем показатель преломления эквивалентного слоя, значение которого растет от 1,499 до 1,502 в интервале рабочих углов падения 54° – 60° . Показатель преломления, полученный экспериментально, изменяется приблизительно в тех же границах.

Следовательно, можно утверждать, что в течение длительного механического полирования на поверхности оптического стекла формируется слабо неоднородный слой, который можно представить как двухкомпонентный, состоящий из основного слоя толщиной около 200 нм и слоя меньшей толщины вблизи внешней поверхности основного слоя с соответствующими параметрами (3).

В [6] высказано предположение о существовании двух факторов, которые влияют на свойства показателя преломления полированного слоя: вы-

сокие локальные давления, которые приводят к увеличению показателя преломления через уплотнение материала основы, и выщелачивание ионов металла полировальной суспензией, которое ведет к уменьшению показателя преломления в приповерхностной области. Результирующее значение показателя преломления определяется соотношением между действием этих двух факторов.

В случае стекла марки К8 может проявляться действие второго фактора. Действительно, как видно из (3), показатель преломления внешнего компонента меньше, чем внутреннего, и оба они меньше показателя преломления основы – ненарушенного стекла (1,5174). Это может быть следствием действия полировальной суспензии, которая приводит к обеднению приповерхностного слоя стекла высокопреломляющими металлическими ионами.

Безусловно, реальный полированный слой имеет более или менее размытую структуру и соответствующие размытые профили показателя преломления как возле внешней, так и особенно возле внутренней границ слоя. Однако если размывание границы происходит на длине, которая значительно меньше длины световой волны и общей толщины полированного слоя, то такая граница в параметрах отраженной световой волны будет проявляться как практически плоская. Тогда, как это видно из представленных данных и их анализа, в целом неоднородный полированный слой можно представить в виде двухкомпонентной системы эквивалентных однородных слоев.

Выводы

Эллипсометрическими измерениями установлено, что на поверхности механически полированного оптического стекла К8 существует определенный слой модифицированного обработкой стекла, характеристики которого коррелируют с деталями режима полирования, и поэтому его можно трактовать как полированный слой, наведенный полированием. В модели однородной однослойной системы найдены показатель преломления, его дисперсия в видимой области спектра и толщина полированного слоя. Показатель преломления меньше показателя преломления ненарушенного стекла и близок к 1,5, а толщина изменяется от 700 до 200 нм с увеличением глубины полирования. Установлено, что при глубокой полировке полированный слой можно представить как двухкомпонентный, включающий основной слой толщиной около 200 нм и переходный слой толщиной около 50 нм на поверхности основного слоя.

Автор выражает глубокую благодарность Я. Шибико за помощь при измерениях.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Владимирова Т.В., Горбань Н.Я., Маслов В.П., Мельник Т.С., Одарич В.А.* Исследование оптических свойств и строения поверхностного слоя ситалла // ОМП. 1979. № 9. С. 31–34.
2. *Владимирова Т.В., Маслов В.П., Одарич В.А., Скачков М.М.* Исследование методом эллипсометрии поверхности оптических материалов после механической обработки // ОМП. 1981. № 1. С. 60–61.
3. *Маслов В.П., Одарич В.А.* Эллипсометрические исследования механически полированных образцов некоторых оптических стекол // ОМП. 1983. № 3. С. 60–62.
4. *Маслов В.П., Мельник Т.С., Одарич В.А.* Эллипсометрические исследования поверхности кристаллического кварца после механической обработки // ОМП. 1985. № 4. С. 1–2.
5. *Маслов В.П., Мельник Т.С., Одарич В.А.* Контроль поверхности полированных стекол эллипсометрическим методом // Изв. вузов. Приборостроение. 1988. Т. 31. № 12. С. 67–69.
6. *Yokota H., Sakata H., Nishibori M., Kinoshita K.* Ellipsometric study of polished glass surfaces // Surf. Sci. 1969. V. 16. № 1. P. 265–274.
7. *Bennett J.M., King R.J.* Effect of polishing technique on the roughness and residual surface film on fused quartz optical flats // Appl. Opt. 1970. V. 9. № 1. P. 236–238.
8. *Malin M., Vedam K.* Ellipsometric studies of environment sensitive polish layers // J. Appl. Phys. 1977. V. 48. № 3. P. 1155–1157.
9. *Пшеницын В.И., Холдаров Н.Х., Храмовский И.А., Калинина М.А., Тихомирова Н.И.* Изменение оптических характеристик поверхностного слоя стекла при полировании // ОМП. 1987. № 8. С. 28–31.
10. *Vedam K.* Characterization of defects in real surfaces by ellipsometry // Surf. Sci. 1976. V. 56. № 1. P. 221–236.
11. *Мансуров Г.М., Мамедов Р.К., Сударушкин А.С., Сидорин В.К., Сидорин К.К., Пшеницын В.И., Золотарев В.М.* Исследование природы полированной поверхности кварцевого стекла методами эллипсометрии и спектроскопии // Опт. и спектр. 1982. Т. 52. В. 5. С. 852–857.
12. *Нечаева Н.А., Журавлев Г.И., Лисицын Ю.В.* Применение метода эллипсометрии для оптимизации процесса глубокого полирования // ОМП. 1984. № 9. С. 61–62.
13. *Храмовский И.А., Пшеницын В.И.* Влияние полирующего абразива на оптические характеристики поверхностного слоя // ОМП. 1987. № 7. С. 29–31.
14. *Hitohiro F., Nobunori O., Nobuyuki K., Hiromishi K.* Distributing of index of refraction in direction, normal to the polished surface of fused quartz, measured by the method of ellipsometry // J. Appl. Phys. 1979. V. 50. № 5. P. 3653–3657.
15. *Храмовский И.А., Пшеницын В.И., Мишин А.В., Толмачев В.А., Холдаров Н.Х.* Исследование поверхност-

- ных слоев свинцово-силикатного стекла методом эллипсометрии // Физ. и хим. стекла. 1987. Т. 13. № 1. С. 104–111.
16. *Neuman Klaus*. Ellipsometric determination of the surface layers on the polished optical glasses // Opt. Acta. 1983. V. 30. № 7. P. 967–980.
17. *Аюпов Б.М., Козлова Н.А.* Обнаружение нарушенного слоя на поверхности кремния посредством метода монохроматической нулевой эллипсометрии // Оптический журнал. 2006. Т. 73. № 3. С. 72–76.
18. *Толмачев В.А.* Адсорбционно-эллипсомертрический метод исследования оптического профиля, толщины и пористости тонких пленок // Оптический журнал. 1999. Т. 66. № 7. С. 20–34.
19. *Толмачев В.А.* Определение толщины толстых прозрачных пленок с помощью метода многоугловой эллипсометрии // Оптический журнал. 2002. Т. 69. № 1. С. 73–76.
20. *Бятец М.А., Куц В.І., Одарич В.А., Панасюк В.Й.* Еліпсометричні дослідження діелектричних шарів, напилених на кварцове скло // Вісник Київського університету. Фіз.-мат. науки. 1992. № 7. С. 7–12.
21. ГОСТ 13659-68. Стекло оптическое бесцветное. Физ.-хим. свойства. М.: Изд-во стандартов, 1968. 60 с.
-