

ВЛИЯНИЕ ПОВЕРХНОСТНОГО СЛОЯ ПРИ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОМ ОПРЕДЕЛЕНИИ ОПТИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК КВАРЦЕВЫХ ПОДЛОЖЕК МЕТОДОМ ЭЛЛИПСОМЕТРИИ

Using methods of multiangular and spectral ellipsometry, optical parameters of specially made quartz substrate were estimated. The role and influence of a broken surface layer was determined at calculations of certain parameters. It is supposed that a reason of increased losses of light in the range of 480 – 600 nm is abnormal dispersive property of the surface layer of the studied substrate.

Ранее в работе [1] при моделировании поверхностных слоев аналитически было установлено, что только их наличие приводит к изменению на порядок воспроизводимости рассчитанных значений показателя преломления и световых потерь оптической подложки. В плане метрологической обоснованности оптических параметров в технологии получения и контроля промышленных планарных оптических элементов необходимо было провести экспериментальные исследования специально подготовленных образцов с целью опытного подтверждения сделанных аналитических выводов. Одновременно произведены исследования влияния дисперсии реального поверхностного слоя. Ниже приводятся результаты такого исследования. В качестве образца использовались кварцевые цилиндры высотой и диаметром равным 1 см.

В эксперименте были использованы многоугловой эллипсометр модели ЛЭФ 3М-1 [2], оригинальный спектральный эллипсометр ES-2 [3] и атомно-силовой микроскоп NT-206[4].

Результаты измерений на многоугловом эллипсометре ЛЭФ 3М-1 при длине волны 632,8 нм представлены на рис. 1.

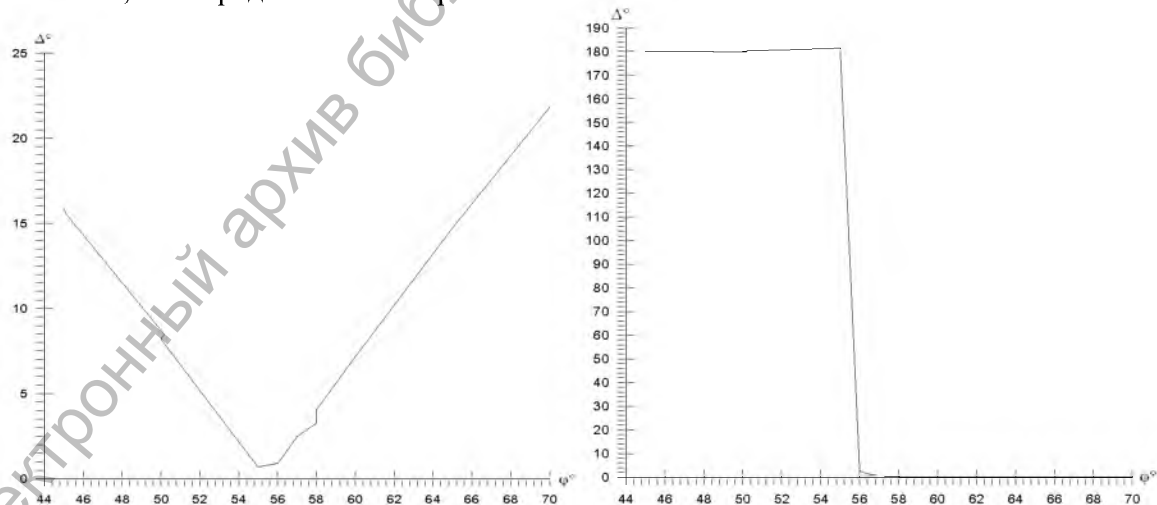


Рисунок 1 – Экспериментальные зависимости значений углов Δ и ψ от угла падения φ для цилиндров из кварца

Приведенные значения $\Delta(\varphi)$ и $\psi(\varphi)$ использовались для расчета оптических параметров образца в рамках модели полубесконечной среды и модели плоскопараллельного слоя на полубесконечной подложке.

Расчет осуществлялся по следующему алгоритму. Задавались начальные, конечные и шаг изменения оптических параметров (n_i, k_i, d_i), характеризующие изучаемую оптическую систему. Решая прямую задачу эллипсометрии для перебираемых оптических параметров с тем шагом, которые мы задаем, находим теоретические значения поляризационных углов ψ_m и Δ_m . Затем провели расчет минимума невязки по формуле

$$G = \sum_{j=1}^N \left[\Delta_{j,m} - \Delta_{j,p} \right]^2 + \left[\psi_{j,m} - \psi_{j,p} \right]^2, \text{ где } N - \text{число измерений, } \psi_m \text{ и } \Delta_m \text{ теоретические значения поляризационных углов, а } \psi_p \text{ и } \Delta_p \text{ экспериментальные значения поляризационных углов для изучаемого объекта.}$$

Вычислительная задача отражательной эллипсометрии состоит в нахождении такого набора оптических параметров (n_i, k_i, d_i), характеризующих изучаемую оптическую систему, для которого величина G минимальна. Этот набор (n_i, k_i, d_i) и будет искомыми оптическими параметрами исследуемого образца [5].

С применением первой модели были получены значения показателя преломления кварцевого цилиндра равным 1,458, а показатель потерь равным 0,0004. С такими параметрами функционал невязки для Δ и ψ равен 0,0028. Для варианта со второй моделью показатель преломления стеклянной подложки равен 1,457, показатель потерь равен 0,00035, поверхностный слой при этом имеет толщину 15 нм с показателем преломления 1 и показателем потерь 0,002. В этом случае функционал невязки для Δ и ψ равен 0,0028.

Таким образом, из представленных результатов видно, что учет поверхностного слоя в нашем случае к улучшению результатов не привел.

Полученные значения были использованы для априорной точки в спектральной эллипсометрии.

После были проведены эксперименты на атомно-силовом микроскопе. Результаты его приведены на рис. 2.

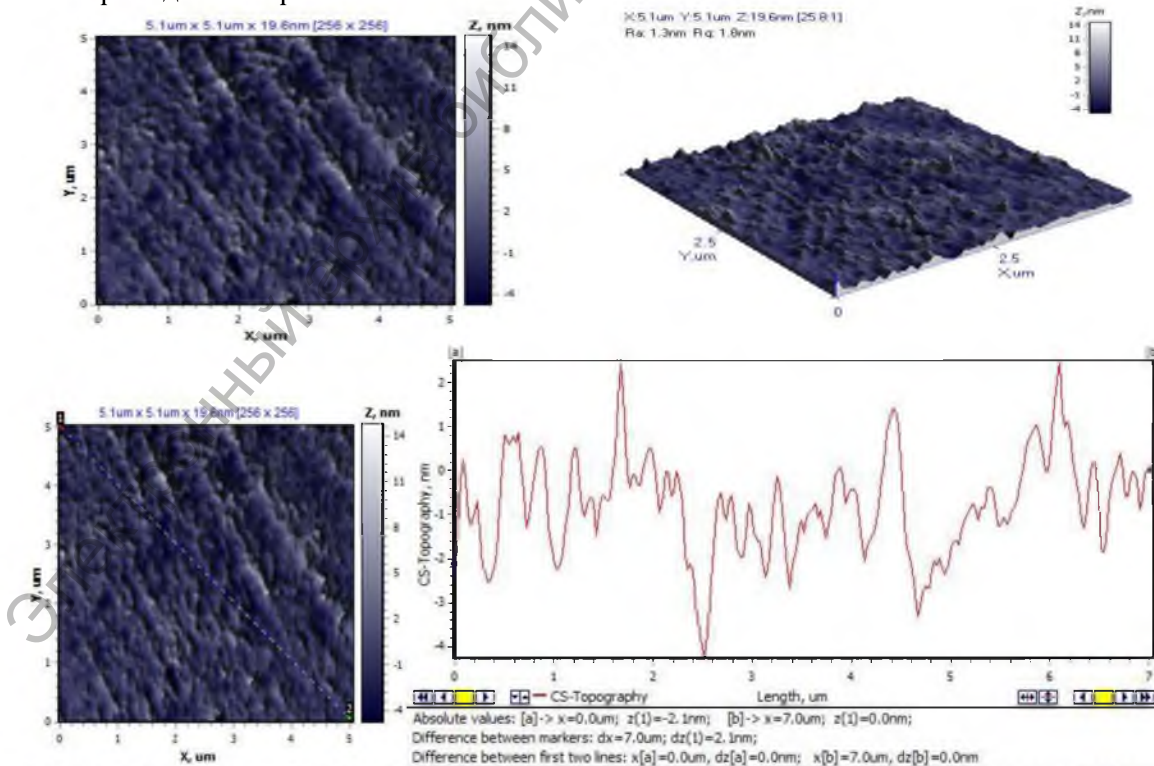


Рисунок 2 – Снимки поверхности кварцевого образца, полученные на атомно-силовом микроскопе

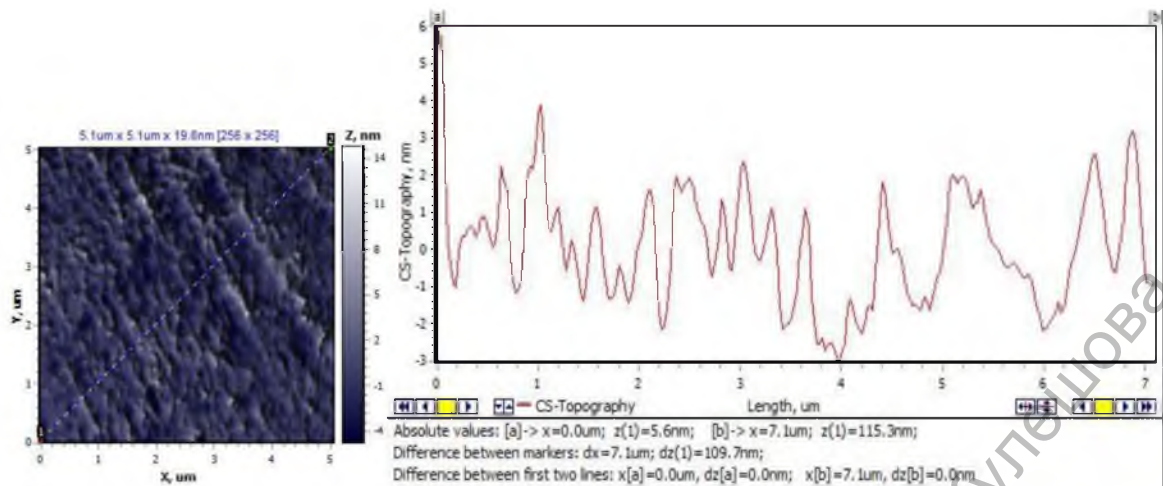


Рисунок 2 – Снимки поверхности кварцевого образца, полученные на атомно-силовом микроскопе

Как видно из профилограммы поверхностный слой существует с размерами, примерно, около 7 нм. Относительно размеров сканированной поверхности, измеряемый в мкм данный слой весьма незначителен.

Рассмотрим результат тестирования образца эллипсометром ES-2. Полученные зависимости представлены на рис. 3.

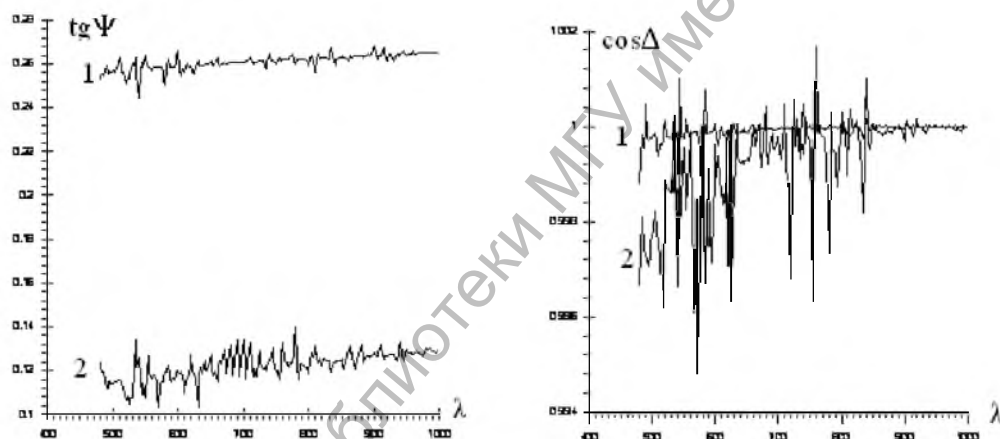


Рисунок 3 – Спектральные зависимости $cos\Delta$ и $tg\Psi$ при угле падения: 1 – $\varphi=65^\circ$, 2 – $\varphi=60^\circ$

Полученные численные экспериментальные значения использовались при решении обратной задачи эллипсометрии в приближении полубесконечной модели. Результаты решения обратной задачи представлены на рис. 4.

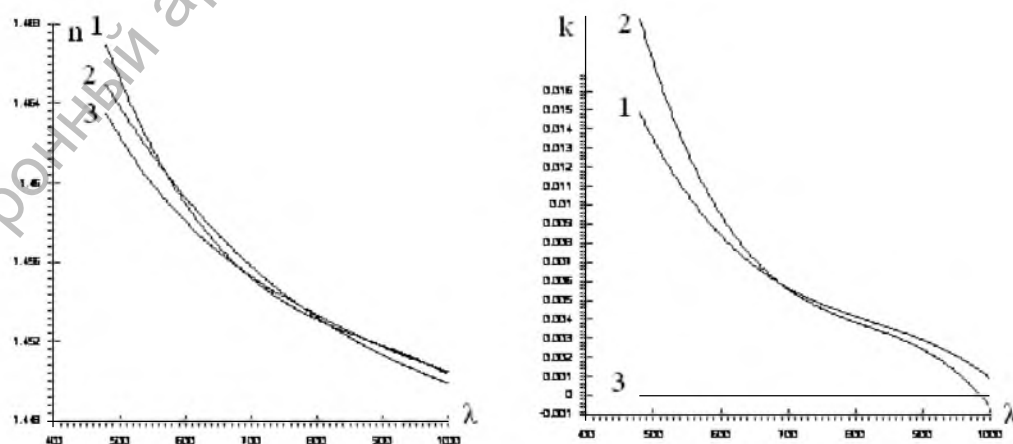


Рисунок 4 – Спектральные зависимости показателя преломления n и показателя потерь k от длины волны λ исследуемого образца в рамках полубесконечной модели при углах падения: 1- 65° , 2- 60° , 3 – эталонная для кварца [6]

Из представленных результатов видно, что явные несовпадения приходятся на интервал от 480 нм до 600 нм, как по показателю преломления, так и по показателю потерь от априорных оптических характеристик кварца. Такая же картина наблюдается при сравнении этих же показателей и для углов падения 60° и 65° .

Из анализа расчетных и литературных данных [6] и представленных модельных расчетов причиной таких наблюдаемых разногласий может являться поверхностный слой.

Поэтому интерес представляет решение задачи по определению дисперсионных характеристик непосредственно самого поверхностного слоя.

Прежде всего, обращает на себя внимание тот факт, что для области от 630 до 1000 нм никаких заметных количественных различий в параметрах слоя не удалось обнаружить, решая обратные задачи с привлечением экспериментальных данных полученных как от ЛЭФ 3М-1, так и от ES-2. Тем не менее, в области от 500 до 505 нм были получены априорные значения по оптическим показателям и толщинам приповерхностного слоя. При этой длине волны после обработки экспериментальных данных полученных от ES-2 были рассчитаны следующие параметры слоя: толщина $7 \pm 0,7$ нм, показатели: преломления $1,390 \pm 0,005$, потерь $0,025 \pm 0,005$. Полученное значение толщины совпадает с данными атомносиловой микроскопии. Эти данные использовались в качестве опорных при определении дисперсии приповерхностного слоя в более широком диапазоне длин волн. Данные расчеты проводились в рамках программы Spel [6]. Результаты расчета представлены на рис. 5. Необходимо отметить, что расчеты от углов падения 65° и 60° , совпадают.

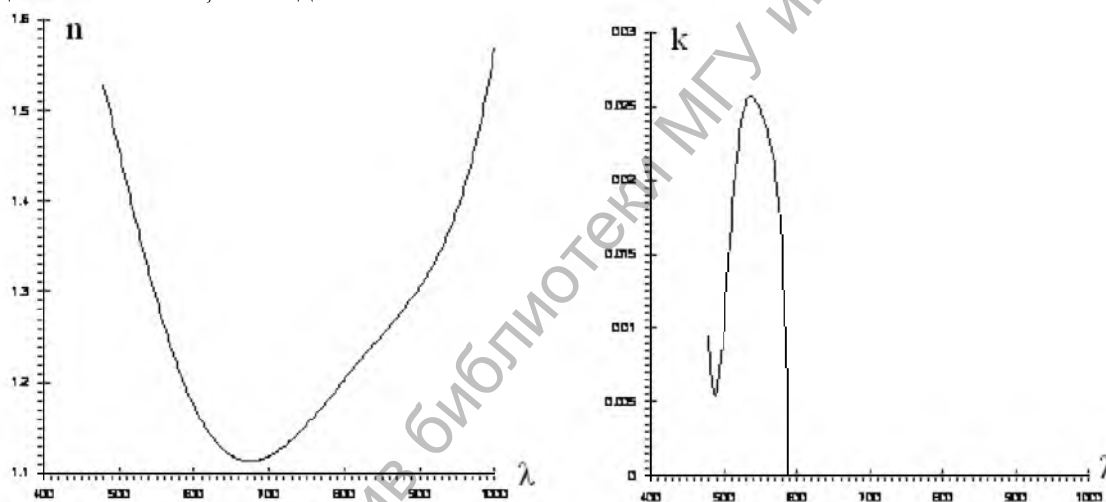


Рисунок 5 – Спектральные зависимости показателя преломления n и показателя потерь k от длины волны λ для поверхностного слоя

Полученные оптические характеристики поверхностного слоя на такой толщине представляются эффективными параметрами и их значения не несут такового физического смысла, как принято считать для объемных оптических характеристик. Из дисперсионной зависимости видно, что эффективный показатель потерь слоя намного выше, чем для кварца в объеме.

Выводы

Проведены эксперименты, позволившие получить эллипсометрические экспериментальные параметры и рассчитать значения толщины, показателя преломления и показателя потерь. Результаты говорят о том, что поверхностный слой менее плотный по сравнению с объемом кварцевого образца, и вносит значительный вклад в светопотери. Данные оптические характеристики на такой толщине можно считать эффективными параметрами. По данным характеристикам можно судить о качестве обработки материалов. Можно предположить, что основной причиной светопотерь является рас-

сеяние света. Это видно из эффективной дисперсии поверхностного слоя. Из приведенных графиков следует, что показатель потерь уменьшается с увеличением длины волны и, начиная с 586 нм, т.е. ближе к инфракрасной области, данный показатель минимален, что согласуется с теоретическим представлением. Этот факт объясняет, почему двухслойная модель, использовавшаяся при обработке эксперимента для многоугольного эллипсометра ЛЭФ ЗМ-1, не дала улучшения значений по сравнению с полубесконечной моделью. Из сказанного следует, что при работе в инфракрасной области можно не учитывать поверхностные слои, если поверхность хорошего качества. При исследовании в ультрафиолетовой и видимой областях спектра необходимо учитывать влияние поверхностных слоев, так как они значительно изменяют оптические характеристики изучаемого объекта.

Список литературы:

1. Старовойтов, Л.Е. Моделирование влияния переходного слоя на эллипсометрические параметры / Л.Е. Старовойтов, Д.В. Ткачёв // Актуальные вопросы физики и техники : материалы I Республиканской научной конференции студентов, магистрантов и аспирантов Гомель. 17 апреля 2012 г. – Гомель, 2012. – С. 214.
2. Скалецкая, И.Е. Введение в прикладную эллипсометрию / И.Е. Скалецкая. – СПб., 2007. – 172 с.
3. Ковалев, В.И. Приборы и техника эксперимента / В.И. Ковалев, А.И. Рукавишников. – 2003. – № 2. – С. 164-167.
4. Tashlykov I.S. [et al] // Przegląd Electrotechniczny. – 2010. – № 7. – Р. 118-121.
5. Малащенко, И.С. Определение оптических и геометрических параметров системы ТАЦ-основа-желатиновый подслой методом эллипсометрии / И.С. Малащенко, Л.Е. Старовойтов, С.С. Гусев // Доклад на Всесоюзной конференции по физико-химической механике кинофотоматериалов. – Казань, 1990. – № 5. – С. 72-75.
6. Тарасов, К.И. Спектральные приборы / К.И. Тарасов. – 2-е изд., доп. и перераб. – Л. : Машиностроение, 1974. – 368 с.