

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОПТИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ПЛОСКОПАРАЛЛЕЛЬНЫХ КВАРЦЕВЫХ ПЛАСТИН ПРИ УГЛАХ БРЮСТЕРА МЕТОДОМ СПЕКТРАЛЬНОЙ ЭЛЛИПСОМЕТРИИ

Н. И. Стаськов^{1*}, А. А. Мухаммедмурадов¹,
Н. А. Крекотень², С. О. Парашков³

УДК 539.231

¹ Могилевский государственный университет имени А. А. Кулешова,
212022, Могилев, Беларусь; e-mail: ni_staskov@mail.ru

² ОАО “ИНТЕГРАЛ” — управляющая компания холдинга “ИНТЕГРАЛ”, Минск, Беларусь

³ Белорусско-Российский университет, Могилев, Беларусь

(Поступила 13 июня 2019)

Предложен способ определения оптических характеристик стеклянных пластин после физико-химической обработки поверхностей, основанный на измерении спектральных зависимостей эллипсометрических углов при углах падения, равных углу Брюстера. Установлено, что по координатам минимумов на спектральных зависимостях эллипсометрических углов можно определить дисперсионную зависимость показателя преломления и оценить толщину поверхностных слоев в процессе изготовления пластин. Рассчитанные по формуле Брюстера спектральные зависимости показателей преломления пластин из оптического кварца КУ-1 в области отсутствия поглощения удовлетворительно согласуются со спектральными зависимостями, которые определяются известными численными методами с использованием программного обеспечения DeltaPsi2 спектрального эллипсометра UVISEL 2 (Horiba). Относительная погрешность определения показателей преломления кварцевых пластин предложенным способом $\leq 0.1\%$.

Ключевые слова: спектральная эллипсометрия, спектральная зависимость показателя преломления, закон Брюстера, поверхностные слои, формулы Зельмейера и Лорентца.

A method is proposed for determining the optical characteristics of glass plates after physicochemical surface treatment, based on measuring the spectra of ellipsometric angles at incidence angles equal to the Brewster angle. It is found that from the coordinates of the minima on the spectra of ellipsometric angles, one can determine the dispersion dependence of the refractive index and estimate the thickness of the surface layers during the process of the plate manufacturing. The refractive index spectra calculated by the Brewster formula for KU-1 optical quartz plates in the region with no absorption are in satisfactory agreement with the spectra determined by known numerical methods using the DeltaPsi2 software of the UVISEL 2 spectral ellipsometer (Horiba). The relative error in determining the refractive indices of the quartz plates by the proposed method does not exceed 0.1%.

Keywords: spectral ellipsometry, refractive index spectrum, Brewster's law, surface layers, Zelmeyer and Lorentz formulas.

Введение. Стеклянные пластины миллиметровой толщины широко используются в качестве подложек для нанесения пленок. Это обусловлено тем, что в области прозрачности стекла (коэффициент поглощения $\alpha(\lambda) = 0$, λ — длина волны оптического излучения) толщина подложки не оказывает влияния на спектры пропускания и отражения, измеренные при нормальном падении излучения

DETERMINATION OF OPTICAL CHARACTERISTICS OF PARALLEL-SIDED QUARTZ PLATES AT BREWSTER ANGLES BY SPECTRAL ELLIPSOMETRY

N. I. Staskov^{1*}, A. A. Mohammedmuradov¹, N. A. Krekoten², S. O. Parashkov³ (¹ A. A. Kuleshov Mogilev State University, Mogilev, 212022, Belarus; e-mail: ni_staskov@mail.ru; ² “Integral” Joint Stock Company, Minsk, Belarus; ³ Belarusian-Russian University, Mogilev, Belarus)

($\varphi = 0$). Если к тому же реальные поверхности являются атомно чистыми плоскостями, то расчет оптических характеристик подложек [1] и нанесенных пленок [2] значительно упрощается. При наклонном падении излучения ($\varphi \neq 0$) некогерентные пучки, отраженные от верхней и нижней поверхностей пластины, частично разделяются [3]. Степень разделения отраженных или прошедших пучков зависит от угла падения, размеров падающего пучка и толщины пластины. Для устранения пучка лучей, отраженных от нижней поверхности, обычно используют иммерсионные среды, шторки или матируют одну поверхность пластины. В работе [4] при исследовании пленок оксида циркония методом спектрофотометрии отражения использованы клиновидные подложки.

При изготовлении подложки поверхности стеклянной пластины подвергают физико-химической обработке. Их шлифуют, полируют и протравливают для удаления загрязнений. Методами многоугловой эллипсометрии установлено [5], что такое воздействие приводит к появлению неоднородных приповерхностных слоев, оптические характеристики которых отличаются от таких же характеристик в объеме пластины. Толщина нарушенного приповерхностного слоя при этом может составлять десятки нанометров.

В работе [6] чистые кварцевые пластины КУ-1, имеющие высокий коэффициент пропускания и низкий коэффициент отражения, получены обработкой поверхностей в вакууме пучком ионов аргона. Поскольку процесс облучения заряженными частицами должен сопровождаться электризацией диэлектрика, таким способом, по-видимому, можно очистить малую поверхность стеклянной пластины. Из-за ограниченной чувствительности методов спектрофотометрии пропускания и отражения малые нарушенные приповерхностные слои, появляющиеся при ионной очистке кварцевых пластин, обнаружить затруднительно. Поиск новых технологий обработки поверхностей и неразрушающих методов определения их оптических характеристик обусловлен тем, что неоднородные приповерхностные слои на подложке влияют на оптические свойства пленок [7].

В последнее время большое внимание уделяется развитию методов спектральной эллипсометрии, которые позволяют расширить круг прикладных оптических задач при исследовании планарных структур. Спектральные зависимости эллипсометрических углов $\psi(\lambda)$ и $\Delta(\lambda)$ определяют отношение амплитудных коэффициентов отражения образца:

$$r_p(\lambda) / r_s(\lambda) = \operatorname{tg} \psi(\lambda) \exp(i\Delta(\lambda)). \quad (1)$$

Кроме спектрофотометрической характеристики, которой является отношение энергетических коэффициентов отражения p - и s -поляризованного света $R_p(\lambda)/R_s(\lambda) = \operatorname{tg}^2 \psi(\lambda)$, методом эллипсометрии определяют спектральную зависимость изменения фазы $\Delta(\lambda)$. В отличие от спектрофотометрических величин $R_p(\lambda)$ и $R_s(\lambda)$ фазовая спектральная характеристика $\Delta(\lambda)$ более чувствительна к поглощению излучения подложкой и параметрам ее поверхностных слоев [8].

Известно [9], что при наличии малого поглощения в граничащих средах или малой толщине переходного слоя между ними угловые зависимости $R_p(\varphi)$ и $\psi(\varphi)$ для монохроматического света имеют минимум в области угла Брюстера. При этом $\Delta(\varphi)$ плавно изменяется на 180° . В работе [10] на этом явлении основан многоугловой спектрофотометрический метод определения показателей преломления n и поглощения k стеклянных пластин толщиной ≤ 1 мм. Отмечено, что точность расчетов показателя преломления зависит в основном от состояния поверхностей исследуемой пластины. Однако неравенство нулю коэффициента отражения $R_p(\varphi)$ полированной кварцевой пластины при угле 55.3° ($\lambda = 1047$ нм) объясняется только поглощением излучения. По данным [11], на этой длине волны стекло (диоксид кремния) не поглощает свет.

Современный спектральный эллипсометр UVISEL 2 (Horiba) имеет программное обеспечение (ПО) DeltaPsi2 для численного решения многопараметрических оптических задач. По измеренным спектральным зависимостям $\psi(\lambda)$ и $\Delta(\lambda)$ можно строго провести диагностику стеклянных пластин: определить дисперсионные функции $n(\lambda)$ и $k(\lambda)$ пластины, обнаружить поверхностные слои и рассчитать их оптические и геометрические характеристики. Для корректного решения этой непростой задачи необходимо [12], во-первых, выбрать определенное количество углов падения излучения на пластину, которые обеспечивают достаточное количество известных данных — измеренных спектров. Во-вторых, в зависимости от угла падения и толщины пластины необходимо подобрать размеры падающего пучка для полного разделения пучков, появившихся из-за отражения на верхней и нижней поверхностях пластины. В-третьих, необходимо определиться с неизвестными параметрами, которые рассчитываются по измеренным спектрам. Такие параметры входят в электродинамическую и дисперсионную модели, которые необходимо задать. После этого минимизация целевой функции

с помощью ПО DeltaPsi2 обеспечивает наименьшее расхождение χ^2 или невязку измеренных и рассчитанных спектральных зависимостей эллипсометрических углов. По величине χ^2 устанавливается соответствие моделей реальному образцу.

Цель данной работы — сравнение оптических характеристик, рассчитанных по экспериментальным спектральным зависимостям эллипсометрических углов на основании ПО DeltaPsi2 с использованием электродинамических и дисперсионных моделей и предложенным способом аналитически на основании формулы Брюстера, плоскопараллельных кварцевых пластин, подвергнутых физико-химической обработке.

Теория. Оптическое кварцевое стекло КУ-1 (ГОСТ 15130-86) не поглощает излучение в УФ и видимой ($220 \leq \lambda \leq 1000$ нм) областях спектра [13, 14]. Спектральная зависимость $n(\lambda)$ для этого стекла соответствует показателя преломления диоксида кремния (SiO_2 , стекло) [11]. Для аппроксимации экспериментальной зависимости $n(\lambda)$ кварцевого стекла используют дисперсионную формулу Зельмейера [15, 16]:

$$n = \sqrt{1 + \frac{0.6961663\lambda^2}{\lambda^2 - 68.4043^2} + \frac{0.4079426\lambda^2}{\lambda^2 - 116.2414^2} + \frac{0.8974794\lambda^2}{\lambda^2 - 9896.161^2}}. \quad (2)$$

При решении обратных оптических задач следует учитывать, что спектральные методы отражения, в том числе эллисометрия, ограничены в точности определения показателей преломления материала ($\Delta n = \pm 0.001$) [9]. В связи с этим в области 220—800 нм экспериментальную спектральную зависимость $n(\lambda)$ можно аппроксимировать ($\Delta n/n \leq 0.015$ %) упрощенной формулой Зельмейера:

$$n = \sqrt{A + \frac{B\lambda^2}{\lambda^2 + \lambda_0^2}}, \quad (3)$$

где $\lambda > \lambda_0$, $A = 1.1101$, $B = 0.9894$, $\lambda_0 = 96.5782$ нм. Вне указанного спектрального интервала значения $\Delta n/n$ резко возрастают. В ПО DeltaPsi2 имеется только трехпараметрическая формула (3).

Предположим, что кварцевое стекло не поглощает излучение и его показатель преломления описывается дисперсионной формулой (3) с неизвестными параметрами A , B и λ_0 . Пластина, окруженная прозрачными поверхностными слоями, находится на воздушной подложке. Слои частично заполнены воздухом (f) и кварцем ($1-f$). Показатели преломления слоев рассчитаем по формуле Бруггемана, которая рекомендована в ПО DeltaPsi2 для учета шероховатых поверхностей. Обозначим толщины слоев h_1 и h_2 . Выбранная таким образом трехслойная электродинамическая модель содержит семь неизвестных параметров: A , B , λ_0 , f_1 , h_1 , f_2 , h_2 .

В следующей дисперсионной модели предположим, что стекло поглощает свет. В таком случае из ПО DeltaPsi2 можно использовать четырехпараметрическую дисперсионную формулу Лорентца:

$$n = \sqrt{\varepsilon_\infty + \frac{(\varepsilon_s - \varepsilon_\infty)E_t^2}{E_t^2 - E^2 + i\Gamma_0 E}}, \quad (4)$$

где $E = 1240/\lambda$ — энергия фотона, эВ; λ , нм; ε_∞ — диэлектрическая проницаемость при $\lambda \rightarrow 0$; E_t — энергия фотона, соответствующая собственной частоте электронного осциллятора; Γ_0 — коэффициент затухания электронного осциллятора; ε_s — статическая диэлектрическая проницаемость. Мнимая часть выражения (4) является показателем поглощения k . При использовании трехслойной модели для поглощающей пластины подлежат определению параметры ε_∞ , ε_s , E_t , Γ_0 , f_1 , h_1 , f_2 , h_2 .

В области прозрачности стеклянной пластины $n(\lambda)$ является монотонно убывающей функцией. Для любой λ из рассматриваемого интервала можно однозначно указать показатель преломления и в соответствии с формулой Брюстера

$$n(\lambda) = \tan \varphi(\lambda) \quad (5)$$

определить угол падения φ , при котором зависимость $\psi(\lambda)$ будет иметь минимум. Для чистой прозрачной пластины $\psi = 0$, а для реальной пластины ψ_{\min} . Соответственно, зависимость $\Delta(\lambda)$ скачком или монотонно изменяется на 180° . Таким образом, если в экспериментальной зависимости $\psi(\lambda)$, измеренной при угле φ , присутствует минимум с координатами λ_{\min} , ψ_{\min} , то по формуле (5) можно рассчитать n для найденной длины волны λ_{\min} . При увеличении угла падения минимумы сдвигаются в область коротких длин волн из-за увеличения показателя преломления. Сравним эллипсометрические углы ψ и Δ , рассчитанные с помощью ПО DeltaPsi2, для модельной чистой пластины и пластины с приповерхностным слоем в области 220—800 нм. При этом используем дисперсионную формулу (2) для подложки и формулу Бруггемана ($f = 0.05$) для расчета показателя преломления слоя. Па-

раметр f выбран с учетом возможного уменьшения показателя преломления поверхностных слоев при физико-химической обработке стеклянных пластин в 1.02 раза [5]. Взятые углы падения от 55° до 57° . В указанном интервале находим λ_{\min} , соответствующие минимумам ψ_{\min} при заданных углах падения, и по формуле (5) рассчитываем соответствующие показатели преломления. Если толщина слоя $h < 10$ нм, то минимумы ψ_{\min} линейно зависят от $1/\lambda_{\min}$:

$$\psi_{\min} = ch/\lambda_{\min}. \quad (6)$$

Схожим образом с изменением длины волны изменяется разность углов Δ пластины с приповерхностным слоем и чистой пластины. Безразмерная константа c в формуле (6) зависит от показателя преломления слоя. При увеличении толщины слоя в m раз также увеличивается тангенс угла наклона прямой $\psi_{\min}(1/\lambda)$. Линейность функции $\psi_{\min}(1/\lambda)$ можно объяснить тем, что при малой по отношению к λ величине h оказывается малой фазовая толщина [9, 17] $\delta = 2\pi h(n^2 - \sin^2\varphi)^{0.5}/\lambda$ приповерхностного слоя пластины. В [17] показано, что при малом δ разности эллипсометрических углов слоя на подложке (ψ, Δ) и чистой подложки (ψ_0, Δ_0) являются линейными функциями толщины слоя: $\Delta - \Delta_0 = -ah/\lambda$ и $\psi - \psi_0 = bh/\lambda$. Параметры a и b зависят от угла падения и оптических характеристик слоя и подложки. Поскольку для чистой подложки при угле падения, равном углу Брюстера, $\psi_0 = 0$, то зависимость $\psi_{\min}(1/\lambda)$ можно представить линейной функцией (6). Однако для аналитического расчета оптических характеристик и толщины тонкого слоя на подложке приближенные формулы из [17] неприменимы из-за неопределенности величины Δ_0 при угле Брюстера. Поэтому для оценки толщины поверхностных слоев кварцевых пластин необходимо иметь эталонную пластину.

Результаты и их обсуждение. Спектральные зависимости углов $\psi(\lambda)$ и $\Delta(\lambda)$ в диапазоне 220—800 нм для двух коммерческих пластин КУ-1 N1 ($d_1 = 3.03$ мм) и N2 ($d_2 = 1.58$ мм) измерены на эллипсометре UVISEL 2 (Horiba) при углах падения от 55° до 57° . Углы Брюстера для вышеуказанной спектральной области определены по формуле (5), в которую подставлялись показатели преломления (2). Для того чтобы пластина не касалась предметного столика, она помещалась на опорное кольцо. При измерении спектральных зависимостей эллипсометрических углов пучок лучей, отраженных от нижней поверхности пластины, не затенялся. На рис. 1 для различных углов падения представлены спектральные зависимости $\Delta(\lambda)$ и $\psi(\lambda)$ пластины N1. Подобные спектры получены и для пластины N2. Обратные задачи эллипсометрии решены для трехслойной вышеописанной электродинамической модели. Дисперсия кварцевой пластины задавалась формулой (3). Поскольку количество параметров трехслойной модели равно семи, для решения обратной задачи с помощью ПО DeltaPsi2 использованы спектральные зависимости $\psi(\lambda)$ и $\Delta(\lambda)$, измеренные при всех углах падения. Углы падения от 55.6° до 56.8° обеспечивают высокую чувствительность $\psi(\lambda)$ и $\Delta(\lambda)$ к параметрам пластины N1 в области 220—500 нм.

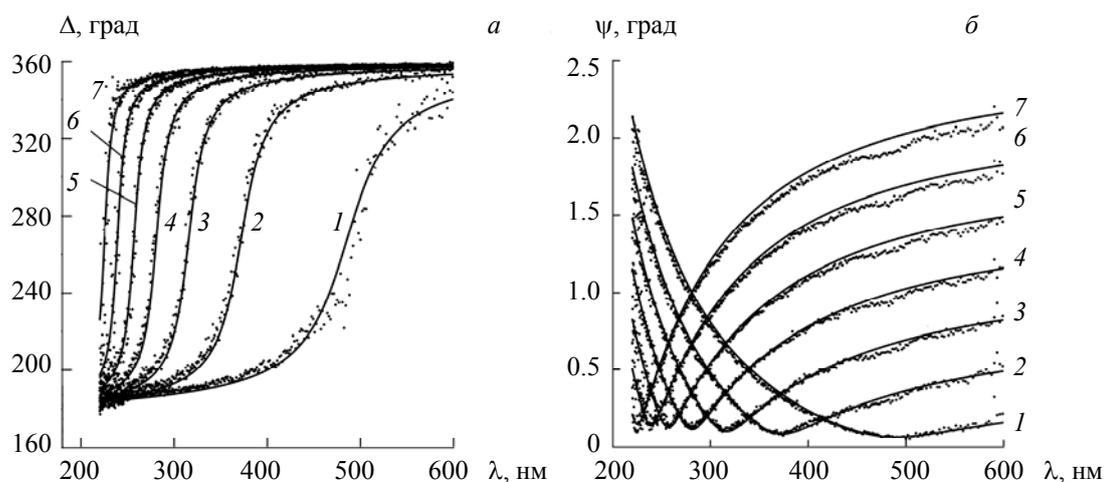


Рис. 1. Измеренные (точки) и рассчитанные (линии) эллипсометрические углы Δ (а) и ψ (б) кварцевой пластины N1 при углах падения 55.6° (1), 55.8° (2), 56° (3), 56.2° (4), 56.4° (5), 56.6° (6) и 56.8° (7)

На рис. 2 приведены спектральная зависимость $n(\lambda)$ чистой кварцевой пластины (кривая 1), рассчитанная по формуле (2), и пластины N1 (кривая 2), рассчитанная по экспериментальным спектрам с помощью ПО DeltaPsi2. Параметры дисперсионной формулы (3): $A = 1.3682$, $B = 0.7236$, $\lambda_0 = 113.3303$ нм. Спектральные зависимости показателей преломления слоев расположены ниже кривой 2. Толщины нижнего и верхнего поверхностных слоев пластины 11.8 и 8.3 нм. Содержание воздуха и кварца в каждом слое Бруггемана одинаковое. На $\lambda = 632.8$ нм показатели преломления слоев и пластины 1.220 и 1.455. Невязка измеренных и рассчитанных поляризационных углов в области 220—800 нм $\chi^2 = 0.044$. При угле падения $\varphi = 56.8^\circ$ в области $\lambda < 200$ нм на зависимость $\Delta(\lambda)$ оказывает влияние поглощение света кварцем (рис. 1, кривая 7). В этом случае $\alpha(\lambda) > 0$. Если для пластины в трехслойной модели использовать дисперсионную формулу Лорентца (4), то $\chi^2 > 10$. Существенное расхождение измеренных и рассчитанных спектров наблюдается в области 220—500 нм. Возможно, это связано с рассеянием на неоднородностях толстых поверхностных слоев.

На рис. 2 приведена спектральная зависимость $n(\lambda)$ пластины N2 (кривая 3), рассчитанная по экспериментальным спектрам с помощью ПО DeltaPsi2. Параметры формулы (3): $A = 0.8972$, $B = 1.1865$, $\lambda_0 = 100.0638$ нм. Для расчетов использованы зависимости $\psi(\lambda)$ и $\Delta(\lambda)$, измеренные для семи углов падения от 55.8 до 56.4° с шагом 0.1° . Области углов падения для пластин N1 и N2 частично перекрываются. Толщины нижнего и верхнего поверхностных слоев пластины N2 3.8 и 2.2 нм. При этом содержание воздуха и кварца в слоях Бруггемана 10 и 90 %. На $\lambda = 632.8$ нм показатели преломления слоев 1.407 и пластины 1.454. Невязка измеренных и рассчитанных поляризационных углов по всему спектру $\chi^2 = 0.021$.

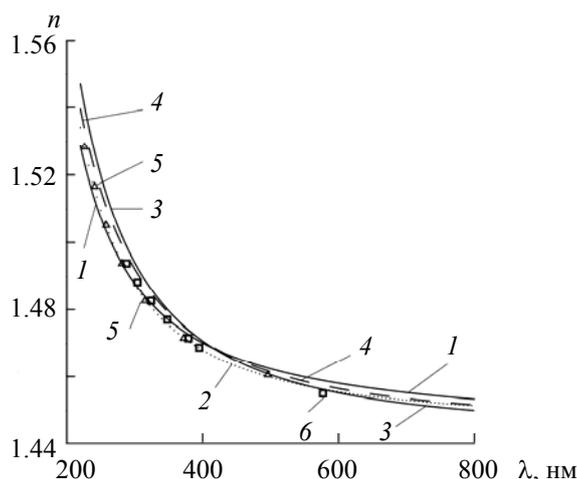


Рис. 2. Показатели преломления чистой кварцевой пластины (1), пластины N1 (2 и 5) и пластины N2 (3, 4 и 6)

Рассмотрим возможность применения формулы (4) для аппроксимации показателей преломления пластины N2. Для этого с помощью ПО DeltaPsi2 найдены восемь неизвестных параметров трехслойной модели. На рис. 2 приведена зависимость $n(\lambda)$ (кривая 4) пластины при $\varepsilon_\infty = 0.8914$, $\varepsilon_s = 2.0835$, $E_t = 13.0088$ эВ, $\Gamma_0 = 23.3$ мкэВ. Вдали от края полосы поглощения $\lambda_0 = 1240E_t^{-1} = 95.32$ нм спектр 4 ближе к 3. Толщины нижнего и верхнего поверхностных слоев пластины 3.1 и 2.1 нм удовлетворительно согласуются с найденными по формуле (3). При этом содержание воздуха и кварца в каждом слое Бруггемана одинаковое (50 %). Невязка измеренных и рассчитанных эллипсометрических углов при использовании дисперсионных моделей (3) и (4) практически не изменилась. На $\lambda = 632.8$ нм показатели преломления и поглощения пластины N2, рассчитанные по (4), равны 1.453 и $1.12 \cdot 10^{-7}$. Чистая пластина на этой длине волны имеет показатель преломления 1.457. Сравнив рассчитанные параметры функций (3) и (4), видим $A \approx \varepsilon_\infty$, $B \approx \varepsilon_s - \varepsilon_\infty$ и $\Gamma \approx 0$. Практически совпадают и граничные длины волн λ_0 . Следовательно, далеко от линии поглощения ($\lambda \gg \lambda_0$) кривые 3 и 4 сходятся, а функции (4) и (3) приводят к одинаковым показателям преломления. По формуле $\alpha = 4\pi k\lambda^{-1}$ рассчитаем буггеровский показатель поглощения пластины N2. На $\lambda = 220$ нм чистое стек-

ло КУ-1 характеризуется $\alpha = 0.004 \text{ см}^{-1}$ [13]. Для нашего стекла $\alpha = 0.060 \text{ см}^{-1}$. По-видимому, расхождение указанных показателей вызвано не только поглощением, но и рассеянием излучения на неоднородностях поверхностных слоев пластины. Влияние параметров таких слоев возрастает с уменьшением длины волны излучения и в значительной степени проявляется в УФ области.

При всех углах падения удалось разделить некогерентные пучки, отраженные от верхней и нижней поверхностей пластин, и поочередно направить их на приемник эллипсометра. Невязка χ^2 и параметры (3) практически не изменяются для каждой пластины. Поведение кривых 2 и 3 показывает, что показатели преломления объемных частей двух пластин одинаковые ($\Delta n/n \leq 0.2 \%$). Как видно, упрощенная формула Зельмейера удачно аппроксимирует показатели преломления исследуемых пластин КУ-1. Потери света происходят в поверхностных слоях, которые в пластинах N1 и N2 имеют разные толщину, долю воздуха и показатели преломления. Эти параметры характеризуют состояние поверхностей пластин при физико-химической обработке. Поверхности пластины N1 хуже обработаны по сравнению с пластиной N2, которую используем как эталонную.

При увеличении угла падения на пластину N1 от 55.6 до 56.8° минимумы Брюстера на спектральных зависимостях $\psi(\lambda)$ (рис. 1) и соответствующее изменение разности фазы на зависимостях $\Delta(\lambda)$ смещаются в коротковолновую область. При этом минимумы на $\psi(\lambda)$ увеличиваются, а области изменения разности фазы ортогонально поляризованных компонент излучения от 180 до 360° уменьшаются. Этот эффект наблюдается и на спектральных зависимостях эллипсометрических углов пластины N2 при увеличении угла падения от 55.8 до 56.4° . Длины волн, на которые приходятся минимумы зависимостей $\psi(\lambda)$ и соответствующие области изменения $\Delta(\lambda)$ при одинаковых углах падения (55.8 , 56 и 56.2°) излучения на пластины N1 и N2, не совпадают. Не совпадают и интенсивности соответствующих минимумов на зависимостях $\psi(\lambda)$. Расчеты показывают, что на теоретических зависимостях $\psi(\lambda) = \arctg \sqrt{R_p / R_s}$ для чистой пластины при углах Брюстера $\psi(\lambda) = 0$ зависимость $\Delta(\lambda)$

скачком изменяется на 180° . Неравенство нулю интенсивностей минимумов на зависимостях $\psi(\lambda)$ связано с разными характеристиками поверхностных слоев на исследуемых пластинах. После определения длин волн, соответствующих минимумам измеренных зависимостей $\psi(\lambda)$, и расчетов по формуле Брюстера (5) показателей преломления пластин построены кривые 5 (пластина N1) и 6 (пластина N2) на рис. 2. В УФ области эти кривые ближе к кривой 1. В видимой области спектра кривые 5 и 6, как и кривые 2–4, проходят ниже кривой 1. Возможно, это связано с разной технологией получения оптического кварцевого стекла, показатели преломления которого задаются формулой (1), и исследуемого в настоящей работе.

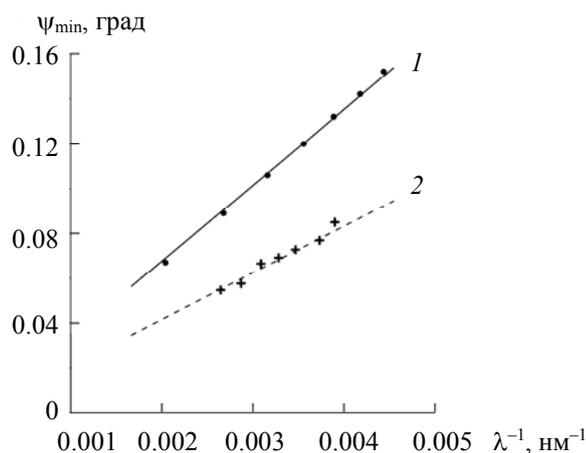


Рис. 3. Спектральные зависимости минимумов эллипсометрического угла для кварцевых пластин N1 (1) и N2 (2)

На рис. 3 приведены экспериментальные зависимости $\psi_{\min}(1/\lambda)$ для пластин N1 и N2. При толщине нижнего поверхностного слоя пластины N2 3.8 нм в формуле (6) безразмерный множитель $c = 5.5$. В этом случае толщина нижнего слоя пластины N1 6.3 нм . Заниженная толщина переходного

слоя, возможно, обусловлена тем, что в настоящей работе использована спектрофотометрическая характеристика пластины $\psi_{\min}(1/\lambda)$. В то же время уменьшение наклона прямой $\psi_{\min}(1/\lambda)$ (кривая 2) свидетельствует об улучшении качества обрабатываемых поверхностей кварцевых пластин. В случае чистых поверхностей прямая $\psi_{\min}(1/\lambda)$ должна совпадать с осью $1/\lambda$.

На рис. 4 приведены рассчитанные спектральные зависимости коэффициентов пропускания T чистой кварцевой пластины и пластин с шероховатым слоем толщиной 8.3 и 11.8 нм. Расчеты выполнены по формулам [18] для чистой пластины и пластины N1, на одной поверхности которой находится слой Бруггемана с эффективными параметрами. Видно, что с уменьшением длины волны кривые 1—3 расходятся, что указывает на увеличение влияния параметров поверхностного слоя пластины на результаты определения их показателей пропускания в УФ области. Следовательно, при определении основных оптических характеристик пленок (коэффициентов преломления и поглощения, ширины запрещенной зоны и энергии Урбаха), которые нанесены на кварцевые подложки, подвергнутые физико-химической обработке, необходимо использовать трехслойную электродинамическую модель подложки.

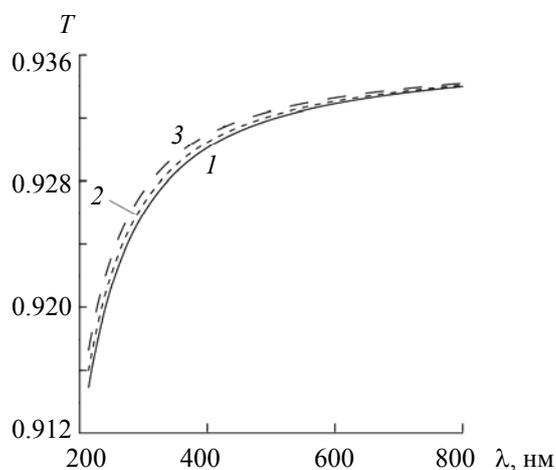


Рис. 4. Спектральные зависимости коэффициентов пропускания чистой кварцевой пластины (1) и пластин с обработанной поверхностью (шероховатый слой толщиной 8.3 (2) и 11.8 нм (3))

Заключение. Учет поверхностных слоев, появляющихся при физико-химической обработке кварцевых пластин, возможен в приближении трехслойной модели. Показано, что в области 220—800 нм показатели преломления исследуемых пластин можно аппроксимировать с помощью упрощенной трехпараметрической формулы Зельмейера (2). В видимой области спектра можно использовать четырехпараметрическую формулу Лорентца для определения дисперсионной зависимости показателя преломления кварцевого стекла. В таком случае измерения необходимо проводить при углах падения $\leq 56.2^\circ$. Низкие (высокие) коэффициенты пропускания или высокие (низкие) коэффициенты отражения кварцевых пластин по сравнению с чистыми пластинами свидетельствуют о наличии поверхностных слоев с показателями преломления, большими (меньшими), чем показатели преломления чистой пластины.

Для стеклянных пластин существует область углов Брюстера, в которой спектрофотометрические и спектроэллипсометрические характеристики чувствительны к параметрам поверхностных слоев. Координаты минимумов на зависимостях $\psi(\lambda)$ определяют показатели преломления пластин. По значениям минимумов на зависимостях $\psi_{\min}(1/\lambda)$ можно контролировать качество обработки поверхностей в процессе изготовления пластин. Толщина поверхностного слоя уменьшается, если в процессе обработки пластин уменьшается угол наклона прямой $\psi_{\min}(1/\lambda)$. Предложенный способ определения $n(\lambda)$ стеклянных пластин и контроль качества их поверхностей перед нанесением пленок не требуют выбора дисперсионных функций и численного решения сложных обратных задач спектральной эллипсометрии. Относительная погрешность определения показателя преломления в этом случае $\leq 0.1\%$. Так как минимумы на зависимостях $\psi(\lambda)$ обусловлены минимумами на $R_p(\lambda)$, то предложен-

ный способ определения оптических характеристик стеклянных пластин можно использовать в спектрофотометрии.

- [1] **R. Swanepoel.** *J. Phys. E: Sci. Instrum.*, **16**, N 12 (1983) 1214—1222
- [2] **D. A. Minkov, G. M. Gavrilo, E. Marquez, S. M. Fernandez.** 2016 XXV International Scientific Conference Electronics (ET), September 12–14, 2016, Sozopol, Bulgaria (2016) 1—4
- [3] **A. Penzkofer, E. Drotleff, W. Holzer.** *Opt. Commun.*, **158** (1998) 221—230
- [4] **А. Б. Сотский, К. Н. Кривецкий, С. О. Парашков, Л. И. Сотская.** *Журн. прикл. спектр.*, **83**, № 5 (2016) 809—817 [**A. B. Sotsky, K. N. Krivetski, S. O. Parashkov, L. I. Sotskaya.** *J. Appl. Spectr.*, **83** (2016) 845—853]
- [5] **В. И. Пшеницын, М. И. Абаев, Н. Ю. Лызлов.** *Эллипсометрия в физико-химических исследованиях*, Москва, Химия (1986) 71
- [6] **В. Г. Жупанов, Ф. В. Григорьев, В. Б. Сулимов, А. В. Тихонравов.** *Вестн. Моск. ун-та. Сер. 3. Физика. Астрономия*, № 6 (2017) 64—67
- [7] **M. R. Nenkov, T. G. Pencheva.** *Eur. Phys. J. Appl. Phys.*, **42**, N 3 (2008) 219—228
- [8] **Аззам, Н. Башара.** *Эллипсометрия и поляризованный свет*, Москва, Мир (1981)
- [9] **H. G. Tompkins, E. A. Irene.** *Handbook of Ellipsometry*, New York, Norwich, William Andrew, Inc., Springer (2005)
- [10] **K. Ogusu, K. Suzuki, H. Nishio.** *Opt. Lett.*, **31**, N 7 (2006) 909—911
- [11] **Edward D. Palik.** *Handbook of Optical Constants of Solids*, Academic Press (1988)
- [12] **Horiba Scientific.** http://nytek.ru/upload/iblock/556/faq-spektralnaya-ellipsometriya-_obshchie-voprosy.pdf (дата обращения: 24.04.2019)
- [13] **ГОСТ 15130-86.** *Стекло кварцевое оптическое*, ИНК изд-во стандартов, Москва (1991) 30
- [14] **Кварцевое стекло для производства оптики ООО “Тидекс”;** http://www.tydexoptics.com/pdf/Fused_Silica_ru.pdf (дата обращения: 24.04.2019)
- [15] **I. H. Malitson.** *J. Opt. Soc. Am.*, **55**, N 10 (1965) 1205—1209
- [16] **R. Kitamura, L. Pilon, M. Jonasz.** *Appl. Opt.*, **46**, N 33 (2007) 8118—8133
- [17] **М. М. Горшков.** *Эллипсометрия*, Москва, Советское радио (1974)
- [18] **J. M. González-Leal, R. Prieto-Alcón, J. A. Angel, D. A. Minkov, E. Márquez.** *Appl. Opt.*, **41**, N 34 (2002) 7300—7308