

## Определение параметров поверхностного слоя чистых жидкостей по данным эллипсометрии

С. Г. Ильина<sup>a</sup>, Е. А. Алексеева<sup>b</sup>

*Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова, физический факультет, кафедра молекулярной физики. Россия, 119991, Москва, Ленинские горы, д. 1, стр. 2.  
E-mail: <sup>a</sup> ilinasg@mail.ru, <sup>b</sup> talekseeva99liza1@gmail.com*

Статья поступила 11.02.2015, подписана в печать 13.08.2015.

Приведен метод вычисления параметров межфазного слоя — показателя преломления и толщины интерфейса жидкость–пар из измерений коэффициента эллиптичности  $\rho$  при нескольких длинах волн зондирующего света по данным работы [1] для нескольких чистых жидкостей. Вычислено изменение значения главного угла падения при возникновении структуры «слой на подложке». Поверхностный слой предполагается однородным.

*Ключевые слова:* граница раздела жидкость–пар, эллипсометрия, главный угол падения.

УДК: 541.121.123.2.332. PACS: 64.70.Fx, 68.03.Hj.

### Введение

В настоящей работе проведены вычисления параметров поверхностного слоя: показателя преломления (ПП) и толщины межфазного слоя на границе раздела жидкость–пар в чистых жидкостях с помощью измеренного в [1] коэффициента эллиптичности отраженного света. В основу метода положено изменение главного угла падения отраженного света от системы «слой на подложке» по сравнению со значением главного угла падения для света, отраженного от подложки ( $n_2$  — показатель преломления слоя,  $n_3$  — показатель преломления подложки.) Указанные идеи были использованы в работе [2] для вычисления параметров критической адсорбции по данным измерений главного угла падения [3]. Как известно, при отражении света от однородного образца, имеющего показатель преломления  $n_3$ , угол Брюстера  $\varphi_B = \arctg(n_3)$  является главным углом падения, т. е. разность фаз  $\Delta = \delta_p - \delta_s$  между  $p$ - и  $s$ -компонентами поляризации отраженного света равна  $\Delta = \pi/2$ . Если образец представляет собой «слой на подложке», то главный угол  $\varphi_{\text{main}}$  вычисляется (или измеряется) специально. Разработанный в [2] метод вычисления параметров слоя заключается в использовании новой экспериментально измеряемой независимой величины  $d\varphi = (\arctg(n_3) - \varphi_{\text{main}})$  — отклонения значения главного угла падения  $\varphi_{\text{main}}$  от угла Брюстера подложки. Наши предварительные исследования решений прямой задачи эллипсометрии для однослойной системы показали, что такие величины, как коэффициент эллиптичности  $\rho$  и  $d\varphi$ , являются независимыми. Задача настоящей работы состоит в исследовании метода вычисления параметров поверхностного слоя для представленных в [1] измерений эллиптичности в чистых жидкостях.

В работе В. А. Кизеля и А. Ф. Степанова [1] измерены значения коэффициента эллиптичности шести чистых непоглощающих жидкостей при четы-

рех фиксированных значениях длин волн падающего света (см. ниже рис. 3).

Сформулированная выше задача является частным случаем вопроса о структуре переходного слоя [4–8], возникающего на границе раздела фаз жидкость–пар и отражающего механизм межмолекулярного взаимодействия. Этот вопрос в настоящее время остается не выясненным до конца как теоретически, так и с точки зрения экспериментального выявления основных параметров поверхностного слоя [11–13]. В работах [14, 15] предполагается, что межфазный слой может быть описан уравнением Ван-дер-Ваальса [9, 10], при этом он содержит жидкую и паровую фазы [14–16]. В теории Я. И. Френкеля [17] предполагается, что жидкость неоднородна, в ней содержатся отдельные межмолекулярные полости (дырки), заполненные паром. Такие образования возникают вследствие флуктуаций при тепловом движении молекул. Эти соображения являются наработками теории межфазного слоя [14, 15]: паровая фаза описывается той частью изотермы Ван-дер-Ваальса, которую обычно считают описывающей неустойчивые состояния. В теории предполагается, что состояние вещества, неустойчивое в объемных фазах, может оказаться устойчивым в тонких межфазных слоях [14, 17]. Согласно теории Ван-дер-Ваальса профиль плотности жидкости в переходном слое имеет вид гиперболического тангенса [9, 10]:  $\rho(z) = \frac{1}{2}[\rho(\alpha) + \rho(\beta)] + \frac{1}{2}[\rho(\alpha) - \rho(\beta)] \cdot \text{th}(2z/d)$ . В настоящее время теоретически получено несколько вариантов профиля плотности (и соответственно показателя преломления) на границе раздела фаз [7] при учете разных межмолекулярных взаимодействий. Среди экспериментальных работ, использовавших методику отражения света и эллипсометрию, укажем работы [1–3, 15, 16]. Общий анализ результатов [7] приводит к заключению, что толщина переходного слоя грубо определяется размером корреляционной длины [11] в веществе: вдали от критиче-

ской области она имеет порядок величины межмолекулярного расстояния, но в окрестности критической температуры  $T_c$  претерпевает скейлинговый рост  $\sim \tau^{-\nu}$ , где  $\nu \sim 0.63$ ,  $\tau = (T - T_c)/T_c$ , в этом случае нужно использовать профиль плотности (в качестве которого признаны пригодными как гиперболический тангенс, так и функция ошибок [7]). Если же толщина слоя гораздо меньше длины световой волны,  $d/\lambda \sim 0.001$ , то все профили плотности (линейный, гиперболический тангенс, функция ошибок) экспериментально неразличимы [15] и подойдет значение показателя преломления, совместимое с другими данными задачи. Поэтому определяемые нами значения показателя преломления и толщины поверхностного слоя жидкость–пар чистых жидкостей ( $n_2$  и  $d$ ) будем считать *эффективными* значениями.

В настоящее время существуют две независимые методики исследования поверхностных явлений: эллипсометрия и новый метод спектроскопии оптического смешения и корреляции фотонов. Новый метод, исследующий поведение и свойства капиллярных волн, позволяет определить значения поверхностного натяжения и вязкости поверхностного слоя [20, 21], эллипсометрия дает толщину и профиль плотности (или показателя преломления) в поверхностном слое [22]. Капиллярные волны являются неотъемлемой частью поверхности, так как представляют собой тепловое движение молекул, они делают границу раздела шероховатой, что может влиять на результаты эллипсометрических измерений. Этот вопрос подробно обсуждается в литературе [23, 24]. Укажем здесь также работу [25], в которой показано, что на поверхности, промодулированной капиллярными волнами, могут возбуждаться бесконечно слабые электромагнитные волны, которые неспособны значительно изменить сигнал эллипсометрии. К этому вопросу мы вернемся при обсуждении результатов.

### 1. Метод расчета

Предлагаемый метод расчета использует эмпирически выявленную зависимость изменения значения главного угла падения от параметров поверхностного слоя. Нашей задачей является получение обоснованного решения. Для корректного (независимого) определения двух независимых величин (в нашем случае — показателя преломления и толщины переходного слоя) требуются два независимых уравнения. В общем случае предполагается наличие профиля плотности (а следовательно, и профиля показателя преломления) в пределах геометрической «толщины». Здесь же будет рассматриваться простейший случай однородного и изотропного поверхностного слоя с показателем преломления  $n_2$  и толщиной  $d/\lambda \sim 0.001$ . Предполагается, что окаймляющие среды 1 и 3 имеют бесконечную толщину. Свет падает на поверхностный слой из «паровой фазы» (для простоты полагаем  $n_1 = 1$ ).

Как известно, эллиптичность отраженного света определяется выражением

$$\rho = |\rho| \cdot e^{i\Delta}, \quad |\rho| = \left| \frac{R_p}{R_s} \right| = \sqrt{\frac{r_p}{r_s}}, \quad (1)$$

где  $R_p, R_s$  — амплитуды,  $r_p, r_s$  — интенсивности плоскополяризованных  $p$ - и  $s$ -компонент отраженного света: амплитуды отражения могут быть представлены в виде  $R_p = A_p + iB_p$ ,  $R_s = A_s + iB_s$ ,  $\Delta$  — сдвиг фаз между  $p$ - и  $s$ -компонентами; согласно формулам Френеля  $\Delta = \delta_p - \delta_s$ ;  $\text{tg}(\delta_p) = \frac{B_p}{A_p}$ ,  $\text{tg}(\delta_s) = \frac{B_s}{A_s}$ . Эллиптичность зависит от структуры поверхностного слоя. Согласно П. Друде эллиптичность представляется формулой

$$\rho = \frac{\pi}{\lambda} \frac{\sqrt{n_3^2 + n_1^2}}{\sqrt{n_3^2 - n_1^2}} \cdot \eta, \quad \eta = \sqrt{\frac{[n^2(z) - n_3^2 - n_1^2]}{n^2(z)}} dz, \quad (2)$$

где  $z$  — координата, перпендикулярная плоскости слоя,  $n(z)$  — показатель преломления слоя, который может состоять из ряда слоев различной толщины и плотности (профиль плотности),  $n_1, n_3$  — показатели преломления окаймляющих (бесконечных по толщине) сред,  $\lambda$  — длина волны падающего света. Теория поверхностного слоя в задаче эллипсометрии дается в работах Д. В. Сивухина [4], а также в работах [5–8].

Для однородного поверхностного слоя формула (2) имеет вид

$$\rho = \pi \frac{d}{\lambda} \frac{\sqrt{n_3^2 + 1} \cdot (n_3^2 - n_2^2)(n_2^2 - 1)}{(n_3^2 - 1)n_2^2}. \quad (2')$$

Согласно теории эллипсометрии измерение коэффициента эллиптичности  $\rho = \sqrt{\frac{r_p}{r_s}}$  проводится при главном угле падения  $\varphi_{\text{main}}$ , при котором сдвиг фаз между  $s$ - и  $p$ -компонентами эллиптически поляризованного света  $\Delta = \pi/2$ . Нами было установлено, что в качестве независимой от  $\rho$  величины может быть выбрана разность  $d\varphi = \varphi_B - \varphi_{\text{main}}$ , где  $\varphi_{\text{main}}$  — значение главного угла падения системы «слой на подложке», тогда как  $\varphi_B = \text{arctg}(n_3)$  — главный угол в случае отражения от подложки (угол Брюстера для чистой жидкости),  $n_3$  — значение показателя преломления жидкости в объеме. Значение  $d\varphi > 0$ , если  $n_2 < n_3$ . Пусть две бесконечные по толщине среды с показателями преломления  $n_1, n_3$  имеют на границе раздела слой толщины  $d$  с показателем преломления  $n_2$ , тогда для амплитуды отраженной волны в [9, 10] получено выражение

$$R = \frac{R_{12} - R_{23} e^{-2i\beta}}{1 - R_{12}R_{23} e^{-2i\beta}}, \quad (3)$$

где амплитуда  $R$  может иметь  $s$ - или  $p$ -поляризацию и содержащиеся в (3) амплитуды  $R_{12} = R_{12}(n_1, n_2)$ ,  $R_{23} = R_{23}(n_2, n_3)$  относятся к той же поляризации;  $\beta = 2\pi \cdot n_2 \cdot \cos \varphi_2 \cdot \frac{d}{\lambda}$ , где  $\varphi_2 = \text{arcsin}(\sin(\varphi)/n_2)$  и  $\varphi$  — угол падения света из среды 1 на среду 2.

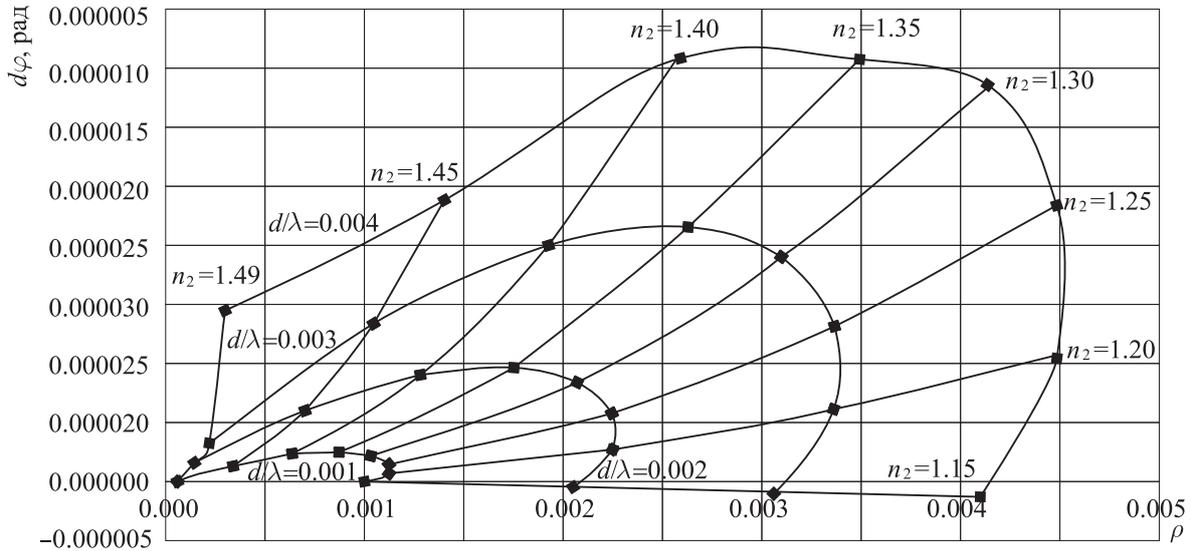


Рис. 1. Номограмма для системы «слой на подложке». Показатель преломления подложки  $n_3 = 1.5$ . Расходящиеся линии — линии равных значений показателя преломления поверхностного слоя;  $n_2 = \text{const}$  (1.15, 1.2, 1.25, 1.30, 1.35, 1.40, 1.45, 1.49). Дугообразные линии — линии равных толщин  $d/\lambda = \text{const}$  (0.001, 0.002, 0.003, 0.004)

Метод вычисления состоит в решении задачи «слой на подложке»:  $R_s$ ,  $R_p$  вычисляются по формуле (3) для заданных значений показателя преломления  $n_3$  подложки (чистая жидкость). Первым шагом является построение номограммы  $d\varphi - \rho$  для значения показателя преломления подложки  $n_3$ . Задается (произвольно) ряд значений показателя преломления слоя  $n_{i2}$  (в данном случае  $n_{i2} < n_3$ ), для каждого из которых также задается несколько значений толщины слоя  $\frac{d_i}{\lambda}$  (например, 0.001, 0.002, 0.006, 0.01, 0.02). Величина  $d\varphi$  представляет собой разность между значениями угла Брюстера и главного угла падения:  $d\varphi = \varphi_B - \varphi_{\text{main}}$ , где  $\varphi_B = \arctg(n_3)$ , главный угол падения определяется экспериментально по минимуму коэффициента эллиптичности или вычисляется из условия равенства  $\Delta = \delta_p - \delta_s = \pi/2$  для сдвига фаз между  $p$ - и  $s$ -компонентами отраженного света. (Угол падения варьируется, при каждом значении угла падения вычисляются значения амплитуд фаз  $s$ - и  $p$ -компонент, а по величине  $\Delta$  фиксируется положение главного угла падения.) Решение состоит в вычислении коэффициентов эллиптичности  $\rho_{ij} = \rho(n_3, n_{2i}, \frac{d_i}{\lambda})$  и значений главного угла падения  $(\varphi_{\text{main}})_{ij}$ , по которым затем строится номограмма в координатах  $(\rho, d\varphi)$ . Расчеты выполнены с помощью математической среды MatLab.

Номограмма, построенная по результатам прямой задачи с использованием уравнения (3), показана на рис. 1. Номограмма представляет собой два семейства линий в координатах  $(\rho, d\varphi)$ : линии равных показателей преломления  $n_{i2}$ , образующие расходящиеся лучевые линии, и линии равных толщин  $\frac{d_i}{\lambda}$  — кривые, напоминающие петли; показатель преломления подложки  $n_3 = 1.5$ ; показатели преломления слоев  $n_{2i}$ : 1.49, 1.45, 1.40, 1.35, 1.30, 1.25, 1.20, 1.15, 1.10, 1.05; ближайшая к оси ординат линия

соответствует  $n_2 = 1.49$ , дальше по часовой стрелке: 1.45, 1.40 и т. д. Здесь линия, соответствующая  $n_2 = 1.15$  (и  $n_2$ , близких к этому значению) проходит вблизи от оси абсцисс, т. е. соответствует очень малым значениям  $d\varphi$  (положительным и отрицательным). Заданные толщины слоев на данном рисунке равны 0.00055, 0.001, 0.002, 0.003, 0.004. На рис. 1 внешняя огибающая линия соответствует отношению  $d/\lambda = 0.004$ , подобная ей, поменьше, — 0.003, далее 0.002 и самая маленькая «петля» построена для  $d/\lambda = 0.00055$ . Для каждого случая программа вычисляет главный угол падения  $\varphi_{\text{main}}$  и эллиптичность  $\rho$ .

На рис. 2 представлена номограмма в координатах  $(\rho, d\varphi/\rho)$ , практически аналогичная предыдущей, но гораздо проще геометрически для определения параметров поверхностного слоя. «Лучи» — линии равных  $n_2$ , «дуги» соответствуют заданным значениям толщины слоя. Эти данные задаются в программе.

Процедура определения параметров слоя следующая: из точки на оси абсцисс, в которой

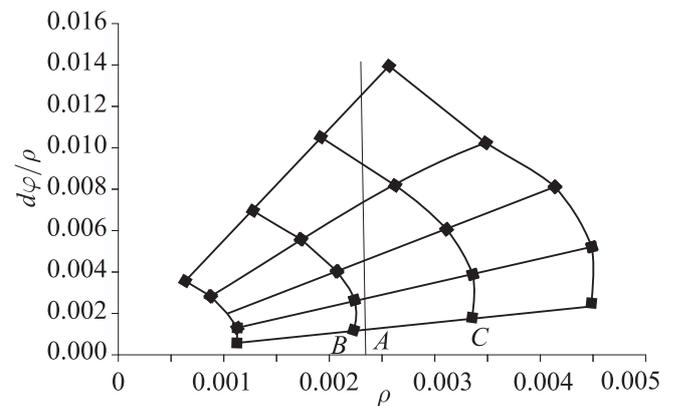


Рис. 2. Номограмма в переменных  $(\rho, d\varphi/\rho)$

Таблица 1

**Вычисленные параметры поверхностного слоя чистых жидкостей**

| № | Название вещества | Показатель преломления $n_2$ поверхностного слоя | Толщина поверхностного слоя $d$ , Å |
|---|-------------------|--|-------------------------------------|
| 1 | Хлорбензол        | 1.4–1.45   | $9 \pm 1$                           |
| 2 | $CCl_4$           | 1.2–1.33   | $8.1 \pm 1.2$                       |
| 3 | Циклогексанол     | 1.27–1.35  | 6–7.5                               |
| 4 | Этиленгликоль     | 1.29–1.35  | 4–6                                 |
| 5 | Нитробензол       | 1.49–1.5   | 12–13                               |
| 6 | м-Ксилол          | 1.2–1.25   | 5–6                                 |

коэффициент эллиптичности равняется измеренному  $\rho$ , восстанавливается перпендикуляр, пересекающий несколько «лучей» и делящий близлежащий «луч» точкой  $A$  на два отрезка, на концах которых (в точках  $B, C$ ) толщина слоя принимает заданные в программе значения. Затем из соотношения длин отрезков «луча»  $BA$  и  $AC$  с помощью интерполяции вычисляется толщина слоя. Таким же образом определяется толщина слоя в точке пересечения перпендикуляра с другим «лучом». Каждая пара значений  $(n_{2i}, d_j)$  определяет точку на плоскости  $(n_2, d)$ , а несколько точек, полученных для одного значения  $\rho$ , дают линию, соответствующую измерению на одной длине волны. На рис. 2 представлен участок номограммы в координатах  $(\rho, d\varphi/\rho)$ . В качестве нижней линии выбираем  $n_2 = \sqrt{n_3}$ . Согласно [31–33] минимальная толщина слоя на подложке, обеспечивающая эллиптическую поляризацию отраженного света, создается слоем вещества, имеющего  $n_2 = \sqrt{n_3}$ . При этом коэффициент эллиптичности отраженного света также минимален. Исходя из этого, выберем в качестве нижнего «луча» на рис. 2 линию, соответствующую  $n_2 = \sqrt{n_3}$ . (Напомним, что «лучом» мы называем линию на рис. 1 и 2, вдоль которой  $n_2 = \text{const.}$ ) Другие «лучи» на рис. 2 соответствуют значениям показателя преломления  $n_2 = \sqrt{n_3} + \Delta_k n$ , а «дуги» — заданным толщинам слоя  $d_i/\lambda$  (0.001, 0.002, 0.003, 0.004). Значения коэффициента эллиптичности отраженного света в точках пересечения «лучей» и «дуг» (рис. 2) вычисляются с помощью MatLab.

Проведя подобные вычисления для каждой из четырех длин волн на шести исследуемых жидкостях из [1] с обязательной последующей обработкой результатов в программе MatLab, получаем для каждого образца график из четырех линий в координатах  $(d, n_2)$ , точка пересечения которых должна соответствовать искомым значениям параметров слоя  $n_2, d$ . Однако поскольку в статье [1] содержатся только значения эллиптичности отраженного света исследуемых жидкостей при четырех длинах волн  $\lambda_1 - \lambda_4$  зондирующего света (рис. 3), а значения

показателя преломления в объеме при  $\lambda_1 - \lambda_4$  в [1] не приводятся, то эти данные, необходимые для проведения описанных выше расчетов, были взяты нами из справочников [28, 29] (табл. 2). По этой причине полученные результаты, представленные в табл. 1, могут рассматриваться как предварительные.

Для проверки метода были проведены вычисления с модельными системами. Были выбраны две слоистые системы с параметрами слоев  $n_2 = 1.35$ ,  $d/\lambda = 0.001$  и  $n_2 = 1.4$ ,  $d/\lambda = 0.003$  (рис. 4). Предполагается, что подложки у обоих модельных систем одинаковые. Показатель преломления подложки для четырех зондирующих световых потоков имеет значения 1.5195, 1.5051, 1.476, 1.4619. Сначала для каждой системы решается прямая задача эллипсометрии, вычисляется коэффициент эллиптичности  $\rho$ . Затем повторяется процедура определения параметров модельных слоев. В результате обнаружилось, что вычисленные параметры поверхностного слоя совпадают с заданными (табл. 3, рис. 4).

**2. Обсуждение результатов**

Представленные в табл. 1 результаты определения параметров поверхностного слоя согласуются с аналогичными данными по порядку величины [11, 12]. При расчетах была выявлена сильная

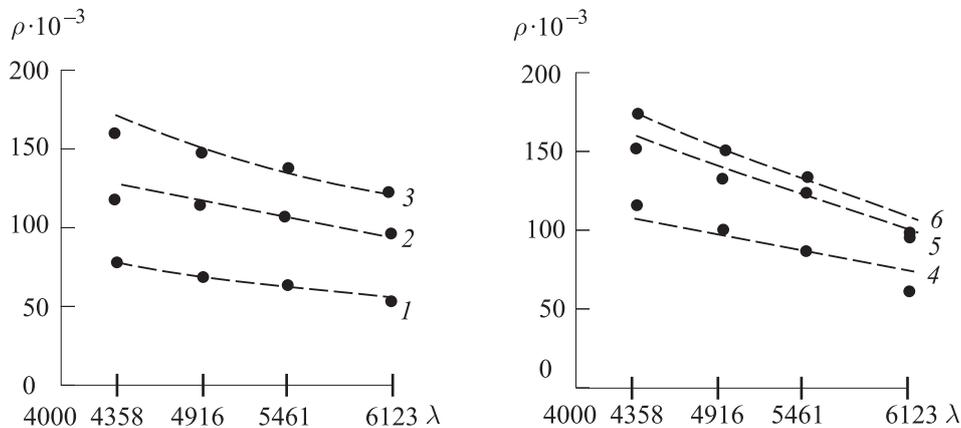


Рис. 3. Зависимость эллиптичности отраженного света от длины волны [1]: кривая 1 — этиленгликоль, 2 — м-ксилол, 3 —  $CCl_4$ , 4 — нитробензол, 5 — циклогексанол, 6 — хлорбензол

Таблица 2

**Значения показателя преломления  $n_3$  и коэффициента эллиптичности  $\rho$  [1]  
отраженного света для исследуемых жидкостей**

| № | Вещество         | Параметр | $\lambda_1 = 4358 \text{ \AA}$ | $\lambda_2 = 4916 \text{ \AA}$ | $\lambda_3 = 5461 \text{ \AA}$ | $\lambda_4 = 6123 \text{ \AA}$ |
|---|------------------|----------|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|
| 1 | Хлорбензол       | $n_3$    | 1.5479                         | 1.5395                         | 1.5313                         | 1.5213                         |
|   |                  | $\rho$   | 0.0017                         | 0.00155                        | 0.00135                        | 0.00100                        |
| 2 | CCl <sub>4</sub> | $n_3$    | 1.4652                         | 1.4641                         | 1.4620                         | 1.4594                         |
|   |                  | $\rho$   | 0.0016                         | 0.0015                         | 0.00139                        | 0.00126                        |
| 3 | Циклогексанол    | $n_3$    | 1.4685                         | 1.4665                         | 1.4645                         | 1.4621                         |
|   |                  | $\rho$   | 0.00153                        | 0.00133                        | 0.00128                        | 0.00096                        |
| 4 | Этиленгликоль    | $n_3$    | 1.4368                         | 1.4350                         | 1.4332                         | 1.4310                         |
|   |                  | $\rho$   | 0.00078                        | 0.00067                        | 0.00064                        | 0.00056                        |
| 5 | Нитробензол      | $n_3$    | 1.5682                         | 1.5624                         | 1.5588                         | 1.5500                         |
|   |                  | $\rho$   | 0.00114                        | 0.00099                        | 0.00089                        | 0.00062                        |
| 6 | м-Ксилол         | $n_3$    | 1.5072                         | 1.5036                         | 1.5000                         | 1.4957                         |
|   |                  | $\rho$   | 0.00116                        | 0.00116                        | 0.00108                        | 0.00099                        |

Таблица 3

**Параметры модельных слоев**

| $n_3$  | $d/\lambda = 0.001, n_2 = 1.35$ | $d/\lambda = 0.003, n_2 = 1.4$ |
|--------|---------------------------------|--------------------------------|
|        | $\rho$                          | $\rho$                         |
| 1.5195 | 0.0009584                       | 0.002238                       |
| 1.5051 | 0.0008966                       | 0.0020126                      |
| 1.476  | 0.0007637                       | 0.001526                       |
| 1.4619 | 0.0006948                       | 0.001274                       |

зависимость результатов от показателя преломления подложки  $n_3$ , поэтому использование табличных значений  $n_3$  очень искажает данные. Свидетельством этого может быть отсутствие пересечения линий. Надо учитывать также, что коэффициент эллиптичности измерялся с ошибкой порядка 8% [30], тогда как используемые для расчета модельных систем значения  $\rho$ , вычисленные из прямой задачи, имели погрешность менее 1%. Возможно, этим объ-

ясняется высокая точность расчета параметров слоя в модельных системах.

**Заключение**

1. Для определения параметров поверхностного слоя в чистых жидкостях по измеренным значениям эллиптичности отраженного света использована новая установленная нами закономерность связи коэффициента эллиптичности  $\rho$  с величиной отклонения  $d\varphi$  главного угла падения для слоистой системы от угла Брюстера подложки  $\varphi_B = \arctg(n_3)$ . Построена схема вычисления искомых величин с помощью математической среды MatLab.

2. Представленные в работе результаты расчетов для модельных образцов дают возможность заключить, что предлагаемый метод дает точные результаты при точных исходных данных (рис. 4). Расчет параметров поверхностного слоя по эллипсометрии отраженного света для реальных чистых жидкостей по данным [1] указывает на определенную погрешность, которая может быть вызвана неопределенно-

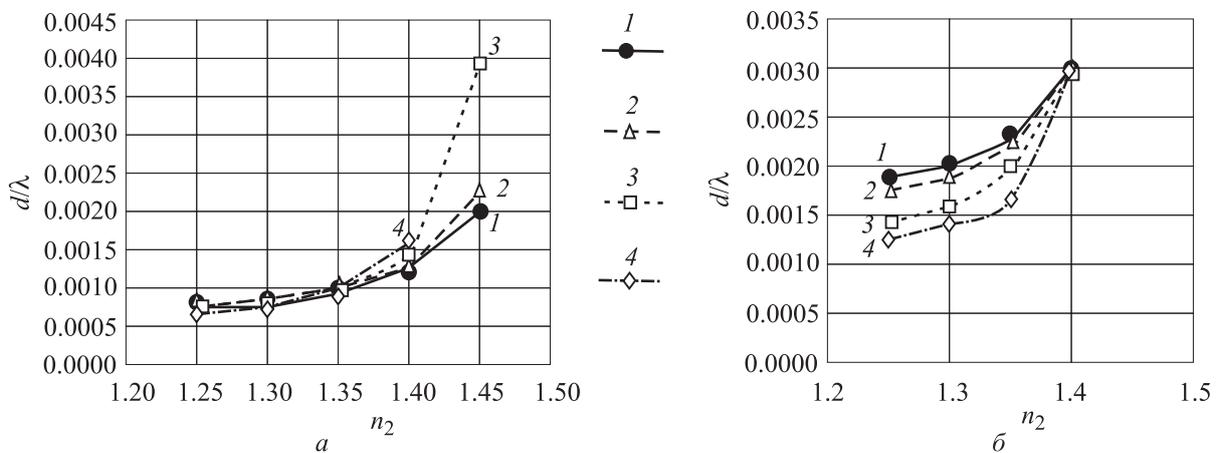


Рис. 4. Зависимость толщины слоя  $d/\lambda$  от показателя преломления модельного слоя  $n_2$  для четырех значений показателя преломления подложки:  $n_3 = 1.5195$  (кривая 1),  $n_3 = 1.5051$  (кривая 2),  $n_3 = 1.476$  (кривая 3),  $n_3 = 1.4619$  (кривая 4)

стью значений показателя преломления жидкостей для использованных спектральных линий зондирующего света или неоправданным предположением о существовании некоторого эффективного значения показателя преломления и толщины поверхностного слоя. Причина и величина указанной погрешности должны быть исследованы и установлены.

3. Результаты обработки данных работы [1] показали, что измерения коэффициента эллиптичности при нескольких длинах волн зондирующего света позволяют найти параметры поверхностного интерфейса жидкость–пар, что является актуальным в случае невозможности высокой точности для прямого измерения главного угла падения для слоистой системы [3]. На настоящий момент известно, что для повышения точности определяемых величин значения показателя преломления жидкости для «рабочих» длин волн должны быть точно известны.

### Список литературы

1. Кизель В.А., Степанов А.Ф. // ЖЭТФ. 1956. **31**. С. 527.
2. Ильина С.Г., Третьякова И.В., Петрова В.А. // Вестн. Моск. ун-та. Физ. Астрон. 2011. № 2. С. 72. (Il'ina S.G., Tret'yakova I.V., Petrova V.A. // Moscow University Phys. Bull. 2011. **66**, N 2. P. 180.)
3. Schmidt J.W. // Phys. Rev. A. 1990. **41**. P. 885.
4. Сивухин Д.В. // ЖЭТФ. 1943. **13**. С. 361; ЖЭТФ. 1948. **18**. С. 976.
5. Schmidt J.W., Moldover M.R. // J. Chem. Phys. 1993. **88**, N 1, P. 582.
6. Kalos M.H., Percus J.K., Rao M. // J. Statistic. Phys. 1977. **17**, N 3.
7. Liu A.J., Fisher M.E. // Phys. Rev. A. 1989. **40**, N 12. P. 7202.
8. Bedeaux D., Blokhuis E.M., Schmidt J.W. // Intern. J. Thermophys. 1990. **11**, № 1.
9. Ван-дер-Ваальс И.Д., Кастамм Ф. Курс термостатики. Т. 1, 2. М., 1936.
10. Вукалович М.П., Новиков И.И. Уравнение состояния реальных газов. М.; Л., 1948.
11. Роулинсон Дж., Уидом Б. Молекулярная теория капиллярности. М., 1986.
12. Байдаков В.Г. Межфазная граница простых классических и квантовых жидкостей. Екатеринбург, 1994.
13. Израелашвили Дж.Н. Межмолекулярные и поверхностные силы. М., 2011. (Israelachvili J.N. Intermolecular and Surface Forces. Elsevier, 2006.)
14. Готовцев В.М., Румянцев А.Н. // Хим. науки. Фундаментальные исследования. 2015. № 11. С. 1338.
15. Жуховицкий Д.И. // ЖЭТФ. 2002. **121**, № 2. С. 396.
16. Готовцев В.М., Шатунов А.Г., Румянцев А.Н., Сухов В.Д. // Современные наукоемкие технологии. 2012. № 11. С. 45.
17. Френкель Я.И. Кинетическая теория жидкостей. Собр. избр. трудов. Т. 3. М.; Л., 1959.
18. Huang J.S., Webb W.W. // J. Chem. Phys. 1969. **50**. P. 3677.
19. Wu E.S., Webb W. // Phys. Rev. A. 1973. **8**. P. 2065.
20. Спектроскопия оптического смешения и корреляция фотонов / Под ред. Г. Камминза и Е. Пайка. М., 1978.
21. Беденек Дж. // УФН. 1972. **106**, № 3. С. 481.
22. Аззам Р, Башара Н. Эллипсометрия и поляризованный свет. М., 1981.
23. Marvin A.M., Toigo F. // Phys. Rev. A. 1982. **26**, N 5. P. 2927.
24. Kuzmin V.L., Romanov V.P. // Phys. Rev. E. 1994. **49**, № 4. P. 2949.
25. Toigo F, Marvin A.M., Celli V., Hill N.R. // Phys. Rev. B. 1977. **15**. P. 5618.
26. Розенберг Г.В. Оптика тонкослойных покрытий. М., 1958.
27. Борн М., Вольф Е. Основы оптики. М., 1970.
28. Иоффе Б.Ф. Рефрактометрические методы химии. Л., 1974.
29. Техническая энциклопедия: Справочник физических, химических и технологических величин. Т. 8. М., 1932.
30. Кизель В.А. // ЖЭТФ. 1954. **26**. С. 228.
31. Пшеницын В.И., Русанов А.И. // Вопросы термодинамики гетерогенных систем и теории поверхностных явлений. 1971. № 1. С. 198.
32. Пшеницын В.И., Русанов А.И. // Доклады АН СССР. 1969. **187**, № 3. С. 619.
33. Кузьмин В.Л., Куни Ф.М., Русанов А.И. // Журн. физ. химии. 1972. **46**. С. 1801.

### Determination of surface-layer parameters on pure liquids via ellipsometry

S. G. Il'ina<sup>a</sup>, E. A. Alekseeva<sup>b</sup>

Department of Molecular Physics, Faculty of Physics, Lomonosov Moscow State University, Moscow 119991, Russia.

E-mail: <sup>a</sup>ilinasg@mail.ru, <sup>b</sup>alekseeva99liza1@gmail.com.

In this work we describe a method for evaluating such parameters of an interfacial layer as the refractive index and thickness of the liquid–vapor interface, based on the measured ellipticity coefficient  $\rho$  at different wavelengths of the probing light and the data [1] for several pure fluids. In particular, the change in the main angle of incidence was evaluated in the “layer on the substrate” structure. The surface layer is assumed to be homogeneous.

**Keywords:** liquid–vapor interface, ellipsometry, the main angle of incidence.

PACS: 64.70.Fx, 68.03.Hj.

Received 11 February 2015.

English version: *Moscow University Physics Bulletin*. 2016. **71**, No. 2. Pp. 208–214.

### Сведения об авторах

1. Ильина Светлана Гарриевна — канд. физ.-мат. наук, ст. науч. сотрудник; тел.: (495) 939-40-34, e-mail: ilinasg@mail.ru.
2. Алексеева Елизавета Алексеевна — студентка; e-mail: alekseeva99liza1@gmail.com.