

В. В. КАРАСЕВ и член-корреспондент АН СССР Б. В. ДЕРЯГИН

**ПРИМЕНЕНИЕ ВРАЩАЮЩЕГОСЯ ПОЛЯРИЗАТОРА
К ИССЛЕДОВАНИЮ СОСТОЯНИЯ ПОЛЯРИЗАЦИИ ОТРАЖЕННОГО
И РАССЕЯННОГО СВЕТА, В ЧАСТНОСТИ, С ЦЕЛЬЮ
ПРЕЦИЗИОННОГО ИЗМЕРЕНИЯ ТОЛЩИН ТОНКИХ ПЛЕНОК**

При измерениях вязкости тонких жидких пленок методом сдувания⁽¹⁾ необходимо измерять толщины h клиновидных пленок с ошибкой $< 10^{-7}$ см. Применение с этой целью обычных приемов измерения эллиптичности отраженного света затруднено клиновидностью пленки, заставляющей прибегать к отражению света от очень узких участков. Ввиду этого была применена следующая методика, варианты которой схематически изображены на рис. 1, а, б и в.

Регулируемая горизонтальная щель A_1 освещалась конденсорной линзой L_1 источником монохроматического света S (ртутная лампа, линия 5460 Å которой отфильтровывалась неодимовым, желтым и сине-зеленым стеклами W). Вторая линза L_2 отбрасывала изображение щели на поверхность пленки $T - T_1$. Вторая горизонтальная щель A_2 служила апертурной диафрагмой, делавшей угол падения достаточно определенным (при необходимости — в пределах $\pm 2'$). Отраженные лучи исследовались или визуально, для чего служила линза L_3 , размывавшая изображение щели (рис. 1, а), или с помощью фотоэлектронного умножителя F (рис. 1, б).

Первоначально ставилась цель определять только коэффициент поляризации k при отражении от пленки естественного неполяризованного света. Так как k есть функция h , то можно обратно по k вычислять h . Измерение k производилось с помощью поляроида (или поляризационной призмы) P_2 (рис. 1, а), вращавшегося с угловой скоростью $\omega \approx 0,5$ Hz; при этом наблюдались мигания с частотой ≈ 1 Hz; поворачивая стопку пластин (не изображенную на рисунке), помещенную между отражающей поверхностью и источником света, можно

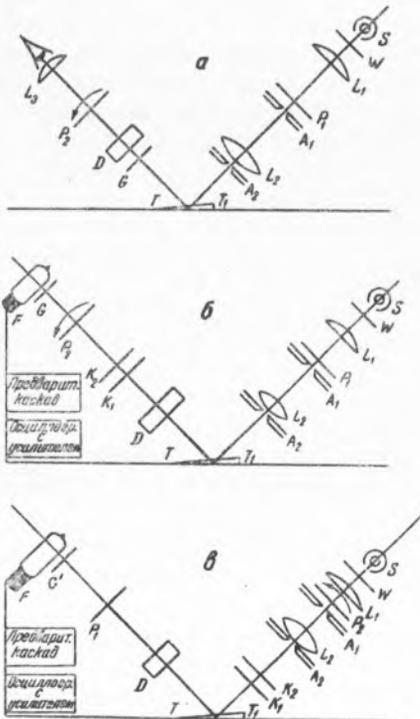


Рис. 1

было компенсировать поляризацию при отражении, уничтожить мигания и по повороту стопки судить о величине k . Очевидно, что аналогичный прием позволяет определять коэффициент поляризации и в других случаях, например при наблюдении рассеянного света, в частности, света, рассеянного земной атмосферой*.

Способ этот значительно точнее других методов поляриметрии, однако имеет следующие неудобства: 1) поворот стопки вызывает боковое смещение проходящих лучей; 2) требуется тщательно исключить или компенсировать возможную частичную поляризацию падающих на отражающую поверхность лучей; 3) необходимо градуировать зависимость между углом поворота стопки пластин и k ; 4) необходимо ставить вторую стопку, так как горизонтальная компонента часто бывает больше вертикальной; 5) большая потеря света. Вследствие этого мы перешли к видоизменению методики.

В этой цели на пути падающих лучей вместо стопки пластин помещалась поляризационная призма P_1 , азимут которой θ , равный углу между электрическим вектором пропускаемых колебаний и плоскостью падения, отсчитывался по лимбу. При соответствующем θ амплитуды обеих компонент отраженного света (s и p) могут быть уравнены. Однако этого недостаточно для исчезновения миганий ввиду того, что теперь эти компоненты когерентны и при разности фаз, отличной от $\pi/2$ или $3\pi/2$, дадут эллиптически поляризованный свет. Здесь возможно использовать тот или иной компенсатор разности фаз (например, компенсатор Бабине-Солейля), доводя ее до $\pi/2$ или $3\pi/2$, что позволяет заодно измерить и относительный сдвиг фаз и значение k . При этом схема измерений становится близкой к той, которой пользуются обычно при измерении эллиптичности отраженного света, за исключением того, что вместо установки анализатора под углом 45° к плоскости падения применяется его непрерывное вращение.

Мы, однако, не пошли по этому пути ввиду следующего принципиального неудобства всех подобных методов: компенсация разности фаз и „компенсация“ неодинаковости амплитуд не могут производиться взаимно независимо и должны осуществляться одновременно путем последовательного приближения к положению компенсации при последовательных, все более точных установках обоих „компенсаторов“, роль одного из которых играет поляризатор. Такая редкая в обычной измерительной практике процедура сильно удлиняет измерения и увеличивает погрешность. Для того чтобы иметь возможность измерять k независимо от разности фазовых скачков при отражении, нами был применен новый прием, заключающийся в устранении когерентности s и p составляющих отраженного света при помощи приспособления, названного „декогерентор“. Это приспособление состоит из толстой (0,5—1 см) пластинки кальцита, вырезанной параллельно оптической оси, ориентированной параллельно плоскости падения. Пластика нарочно делалась не точно плоско-параллельной, вследствие чего при рассматривании в положении D (рис. 1, a) можно было при соответствующем увеличении видеть густую сеть почти сливающихся полос, соответствующих каждая определенной разности хода компонент s и p . В результате слияния этих полос (чему содействует неидеальная параллельность лучей) прошедшие через декогерентор компоненты s и p , будут взаимно некогерентны. В результате при равенстве их амплитуд, достигаемом поворотом поляризатора, падающий на призму P_2 свет ведет себя как естественный, неполяризованный, что можно установить по прекращению миганий. Для еще лучшего

* Этот метод был нами осуществлен в 1945—1946 гг. и тогда же применен к измерениям толщин, необходимым при определении вязкости граничных слоев жидкостей методом сдувания (1). Опубликование несколько задержалось ввиду желания усовершенствовать метод (см. ниже).

устранения когерентности перед декогерентором помещалось матовое стекло G . Если θ есть соответствующий азимут поляризатора, то $k = \operatorname{tg} \theta$.

При визуальном наблюдении точность измерения $k \approx 0,5\%$, что позволяет измерять толщины пленок с точностью до 1 мк. Приводим на рис. 2 полученный таким образом „сдутый“ профиль пленок: чистого вазелинового масла (1), растворов того же масла с 2% каучука (2) и с 0,5% винилола (3). Мы видим, что добавки высокополимеров нарушают постоянство вязкости в граничном слое, характерное для неполярного вазелинового масла.

Следует отметить, что визуальный способ вызывает утомление и значительную затрату времени, если нужно сделать много определений толщин. Однако одним из существенных преимуществ нового метода является возможность использования, вместо глаза, фотоэлемента или фотоэлектронного умножителя с усилением переменной слагающей тока, что может обеспечить огромную точность, быстроту и удобство измерений. Опишем один из вариантов, примененных нами (рис. 1, б)*. В качестве „электрического глаза“ нами применен фотоэлектронный умножитель системы П. В. Тимофеева с сурьмяно-цезиевым катодом. В этом случае матовое стекло G' необходимо ставить перед окном фотоумножителя ввиду зависимости его чувствительности от направления

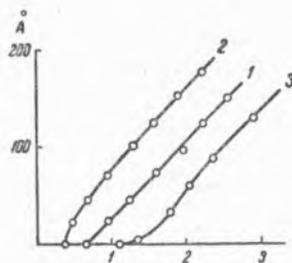


Рис. 2

поляризации. Умножитель связан с предварительным каскадом усилителя, выполненного по обычной реостатной схеме на лампе 6Ф-5, и оформлен в одном блоке с умножителем. Далее этот каскад присоединяется к шестидюймовому осциллографу с усилителем. Общий коэффициент усиления схемы — около 10^5 . Ртутная лампа, являясь безинерционным источником, дает прерывистый свет с частотой 100 Нз, и луч осциллографа описывает прямую линию периодически меняющейся длины. Отсчеты делаются в момент минимума модуляции, когда прямая на осциллографе перестает периодически менять свою длину. Для получения большей точности необходимо, чтобы отклонение луча в несколько раз превосходило диаметр экрана. При этом необходимо смещать луч, чтобы виден был только максимум отклонения. Это достигается вертикальным перемещением луча.

Схема удобна тем, что не требуется ни усиления очень низких частот, ни быстрого вращения поляризатора и, кроме того, лампу можно питать от сети переменного тока. Вычисления толщины пленки становятся значительно проще, если, помимо k , известен относительный сдвиг фазы δ отраженных компонент. Разработанный метод, использующий декогерентор, позволяет, измерив предварительно k , измерить после этого и δ . Для этого, после погашения миганий путем соответствующей ориентировки поляризатора P_1 , декогерентор D выдвигается вбок с пути отраженных лучей. Взамен на пути лучей (рис. 1, б) помещается пластинка $\frac{1}{4} \lambda$ K_1 с осями, ориентированными под углом 45° к плоскости падения, и другая K_2 , которую можно поворачивать с отсчетом азимута по лимбу. (Эти пластинки $\frac{1}{4} \lambda$ могут и постоянно находиться на пути отраженных лучей, что удобнее, в положениях K_1 и K_2 , так как при наличии декогерентора, в момент

* Эта методика была разработана в 1946 г., однако опробование ее задержалось. В текущем году, благодаря любезности сотрудника НИКФИ А. А. Хрущева, нам удалось получить трубку системы Тимофеева с чувствительностью, достаточной для поставленной задачи.

компенсации миганий, они находятся на пути неполяризованных лучей, на которые никакого действия оказывать не могут.)

Первая пластинка $\frac{1}{4}\lambda$ превращает, как известно из аналогичных схем определения эллиптичности отраженного света, проходящий луч в плоско-поляризованный с определенным азимутом ψ . Вторая пластинка $\frac{1}{4}\lambda$ при том же азимуте ψ превращает этот луч в поляризованный по кругу и в силу этого уничтожает мигания при вращении призмы P_2 , возникающие, вообще говоря, при удалении декогерентора. Огромным преимуществом этой схемы является то, что установление двух азимутов θ и ψ должно происходить не одновременно, неудобства чего были указаны выше, а последовательно; при этом также сохраняется возможность измерять θ и k независимо от ψ . Кроме того, в случае применения фотоэлектронного умножителя при этом достигается значительное увеличение точности и чувствительности метода даже при малой площади, отражающей лучи, и малой апертуре освещающего пучка, когда световой поток крайне мал.

Из практических соображений оказалось удобным приблизить поляризатор P_1 к наблюдателю, для чего последовательность расположения поляризационной оптики была изменена на обратную (рис. 1, в): сначала свет проходил через вращающуюся призму (или поляририд) P_2 , отражался от объекта, проходил через две пластинки $\frac{1}{4}\lambda$ K_1 и K_2 , через декогерентор и, наконец, через поляризационную призму P_2 с лимбом и матовое стекло G' .

Ход рассуждений при таком изменении направления лучей на обратное должен существенно измениться и усложниться, однако легко показать, что конечный результат и принцип действия установки остаются прежними.

Для вычисления h достаточно определить путем отражения от сухой „подложки“ константы ее металлического отражения, после чего возможно определять h и n графическим методом И. В. Обреимова⁽²⁾ или расчетным, изложенным нами ранее⁽³⁾.

Лаборатория поверхностных сил
Института физической химии
Академии Наук СССР

Поступило
28 VIII 1948

ЦИТИРОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

- ¹ Б. В. Дерягин, Г. М. Страховский и Д. С. Малышева, ЖЭТФ, 16, 2, 171 (1946); Acta Physicochim. URSS, 19, 541 (1944). ² И. В. Обреимов, ЖЭТФ, 14, 10—11 (1944); Э. Бронштейн, ЖЭТФ, 16, 3 (1946). ³ Б. В. Дерягин, В. И. Гольданский и В. В. Карасев, ДАН, 57, 697 (1947).