

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПОКАЗАТЕЛЯ ПРЕЛОМЛЕНИЯ СРЕДЫ МЕТОДОМ ЭЛЛИПСОМЕТРИИ

Р. Р. Резвый и М. С. Финарев

Рассмотрена зависимость эллипсометрических параметров от показателя преломления среды при отражении света на границе «среда—эталон». Показано, что наибольшая чувствительность эллипсометрических измерений достигается в случае почти полного внутреннего отражения и может регулироваться выбором материала эталона и угла падения света. Точность абсолютных измерений ограничена погрешностями определения показателей преломления эталона и угла падения, но при относительных измерениях точность может быть очень высокой (10^{-4} и выше). Метод может быть полезен при исследовании и контроле свойств оптически плотных жидкостей.

В настоящее время метод эллипсометрии применяется главным образом для исследования оптических свойств отражающих поверхностей и измерения параметров тонкопленочных систем. При этом оптические свойства внешней среды (вакуум, воздух, иммерсионная жидкость, призма полного внутреннего отражения и т. п.) считаются известными.

В данной работе показано, что метод эллипсометрии может найти полезное применение для исследования и прецизионного измерения оптических констант самой внешней среды.

Решение уравнений эллипсометрии

Основное уравнение эллипсометрии имеет вид [1]

$$\operatorname{tg} \Psi \exp(i\Delta) = R_p/R_s, \quad (1)$$

где Ψ и Δ — измеряемые экспериментально поляризационные углы, характеризующие состояние поляризации света, отраженного от границы раздела двух сред. Эти углы связаны с p - и s -компонентами электрических векторов падающей и отраженной волн (соответственно E^i и E^r) и их фазами (δ^i и δ^r) соотношениями

$$\operatorname{tg} \Psi = \frac{E_p^r/E_p^i}{E_s^r/E_s^i}, \quad \Delta = (\delta_p^r - \delta_p^i) - (\delta_s^r - \delta_s^i). \quad (2)$$

В уравнении (1) R_p и R_s — френелевские коэффициенты отражения для p - и s -компонент электрического вектора (p — компонента, параллельная плоскости падения света, s — перпендикулярная ей)

$$R_p = \frac{N_2 \cos \varphi_1 - N_1 \cos \varphi_2}{N_2 \cos \varphi_1 + N_1 \cos \varphi_2}; \quad R_s = \frac{N_1 \cos \varphi_1 - N_2 \cos \varphi_2}{N_1 \cos \varphi_1 + N_2 \cos \varphi_2}. \quad (3)$$

Здесь φ_1 и φ_2 — соответственно углы падения и преломления, N_1 и N_2 — показатели преломления (в общем случае комплексные) граничащих сред.

Для удобства дальнейших вычислений введем обозначения

$$\Phi \equiv \varphi_1, \quad n \equiv N_1, \quad N \equiv N_2 \quad (4)$$

и будем называть n показателем преломления внешней среды, а N — показателем преломления подложки. Если величины n и N — действитель-

ные (т. е. обе среды прозрачные для используемого излучения), то решение уравнения (1) можно представить в виде

$$\Psi = \arctg \left(\frac{n \sin^2 \Phi - \alpha \cos \Phi}{n \sin^2 \Phi + \alpha \cos \Phi} \right), \quad (5)$$

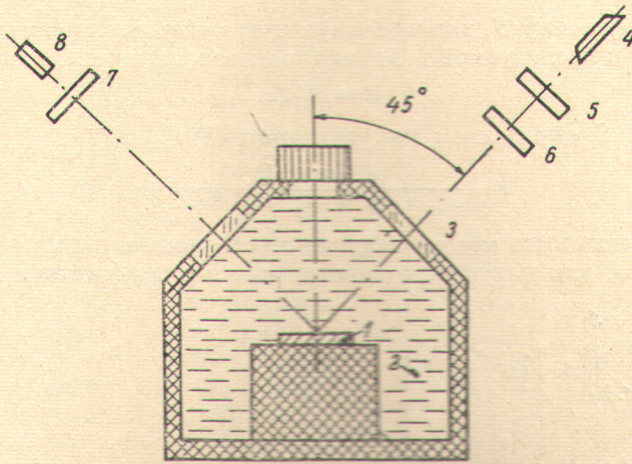


Рис. 1. Схема измерения показателя преломления жидкости на эллипсомере с вертикальной плоскостью падения.

1 — образец, 2 — исследуемая среда, 3 — окно, 4 — источник излучения, 5 — поляризатор, 6 — компенсатор, 7 — анализатор, 8 — детектор.

$$\Delta = \begin{cases} \pi, & \text{если } N \operatorname{ctg} \Phi > n \\ 0, & \text{если } N \operatorname{ctg} \Phi < n < N \operatorname{cosec} \Phi, \end{cases} \quad (6)$$

где

$$\alpha = \sqrt{N^2 - n^2 \sin^2 \Phi}. \quad (7)$$

Варианты, при которых $n > N \operatorname{cosec} \Phi$ (это соответствует явлению полного внутреннего отражения), мы не рассматриваем, так как при этом

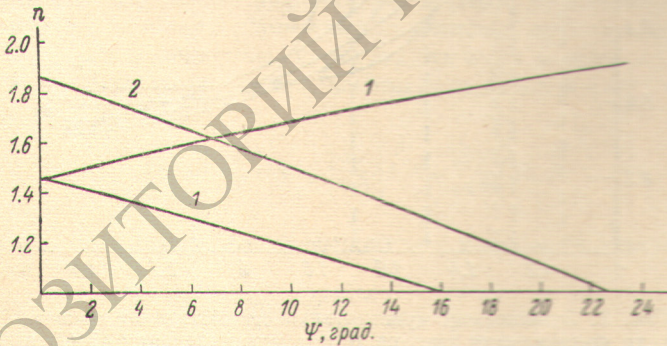


Рис. 2. Зависимость параметра Ψ от показателя преломления исследуемой среды ($\Phi = 45^\circ$). 1 — кварц, 2 — гранат. Верхняя ветвь кривой 1 соответствует значению $\Delta = 0^\circ$.

величина Δ зависит от значений n , N и Φ

$$\Delta = 2 \arctg \left[\operatorname{ctg} \Phi \operatorname{cosec} \Phi \sqrt{n^2 \sin^2 \Phi - N^2/n} \right], \quad (8)$$

$$n \geq N \operatorname{cosec} \Phi.$$

Из уравнений (5) и (6) следует, что при известных значениях N и Φ величины Ψ и n связаны однозначным соответствием. Поэтому по измерению величины Ψ системы «исследуемая внешняя среда—эталонная подложка» (рис. 1) можно определять показатель преломления прозрачной среды, причем измерения нетрудно автоматизировать. На рис. 2

показана зависимость $\Psi(n)$ для двух случаев: в первом — в качестве эталонной подложки используется полированная пластинка плавного кварца, во втором — пластинка граната.¹

Чувствительность метода

Введем величину S , характеризующую чувствительность измеряемого параметра Ψ к исследуемой величине показателя преломления среды n ,

$$S = \partial\Psi/\partial n. \quad (9)$$

Величину S определяем из уравнения (5)

$$S = \frac{N^2 \cos \Phi \sin^2 \Phi}{\alpha (N^2 \cos^2 \Phi - n^2 \sin^2 \Phi \cos 2\Phi)}, \quad (10)$$

т. е. чувствительность метода зависит от соотношения величин n , N и Φ ; следовательно, для каждого конкретного значения (считаем, что прибли-

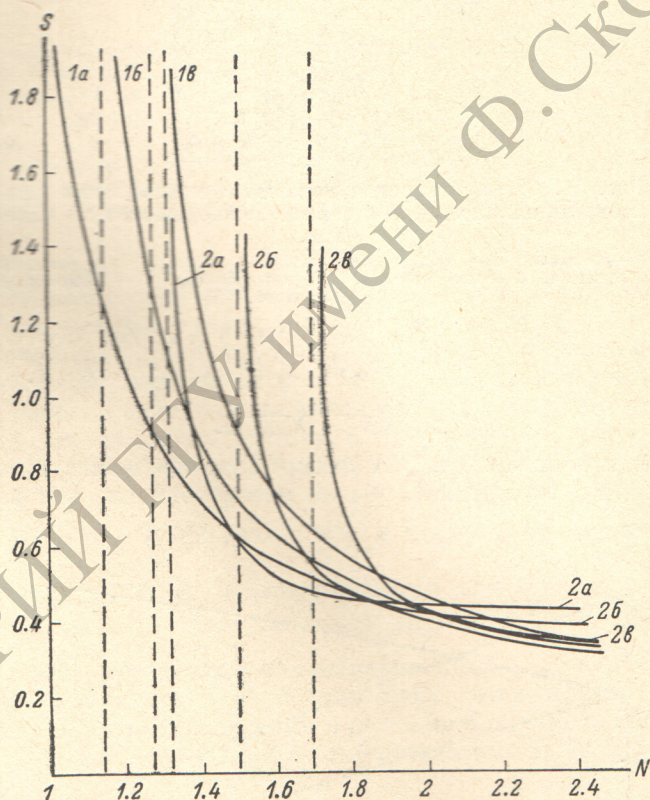


Рис. 3. Зависимость чувствительности метода от показателя преломления эталона N при углах падения 45° (1) и 70° (2).

a , b и c соответствуют различным модельным средам: $a - n=1.4$, $b - n=1.6$, $c - n=1.8$.

женное значение n априори известно) можно выбрать такую комбинацию показателя преломления эталона N и угла падения Φ , при которой чувствительность будет достаточно высокой. Из уравнения (10) следует, что величина $S \rightarrow \infty$ при $n \sin \Phi \rightarrow N$, т. е. наибольшая чувствительность достигается в случае полного внутреннего отражения.

На рис. 3 приведены графики зависимости чувствительности S от величины показателя преломления эталона N для трех модельных сред

¹ Для устранения луча, отраженного от нижней грани эталона, последняя матируется.

($n_1=1.4$, $n_2=1.6$, $n_3=1.8$) при двух углах падения ($\Phi_1=45^\circ$, $\Phi_2=70^\circ$). На практике выбор приемлемых эталонов всегда ограничен, поэтому высокой чувствительности можно достичь, подбирая соответствующий угол падения Φ . На рис. 4 показаны графики зависимости чувствительности от угла падения для тех же трех модельных сред, что и на рис. 3, при использовании в качестве эталона плавленного кварца или граната (их показатели преломления соответственно равны 1.459 и 1.859).

Как видно из рис. 3 и 4, при исследовании оптически плотных сред трудно добиться таких условий, при которых чувствительность метода будет очень высокой. Например, при исследовании жидкости с показателем преломления $n=1.6$ с эталоном из плавленного кварца при угле падения $\Phi=65^\circ$ величина $S \approx 2.65$. Таким образом, при предельной чувствительности обычных эллипсометров $\delta\Psi=1'=0.0003$ рад., предельная чувствительность метода δn составит

$$\delta n = \frac{0.0003}{2.65} \approx 1 \cdot 10^{-4},$$

что не уступает чувствительности специальных рефрактометров.

Точность метода

Так как в выражение (5) входят величины Ψ , N и Φ , определяемые с некоторыми погрешностями, представляет интерес проанализировать влияние последних на точность измерения показателя преломления среды n . Будем считать, что с точностью до малых величин второго и выше порядков абсолютная погрешность в определении показателя преломления среды δn определяется по уравнению

$$\delta n = \left| \frac{\partial n}{\partial \Psi} \right| \delta \Psi + \left| \frac{\partial n}{\partial N} \right| \delta N + \left| \frac{\partial n}{\partial \Phi} \right| \delta \Phi, \quad (11)$$

где $\delta \Psi$, δN и $\delta \Phi$ — абсолютные погрешности измерения величин Ψ , N и Φ .

Учитывая, что

$$\frac{\partial n}{\partial \Psi} = \left(\frac{\partial \Psi}{\partial n} \right)^{-1} = S^{-1}, \quad (12)$$

получаем

$$\frac{\partial n}{\partial N} = \frac{\partial n}{\partial \Psi} \frac{\partial \Psi}{\partial N} = \frac{\partial \Psi}{\partial N} S^{-1}, \quad (13)$$

$$\frac{\partial n}{\partial \Phi} = \frac{\partial n}{\partial \Psi} \frac{\partial \Psi}{\partial \Phi} = \frac{\partial \Psi}{\partial \Phi} S^{-1}, \quad (14)$$

где выражения для $\partial \Psi / \partial N$ и $\partial \Psi / \partial \Phi$, получаемые из уравнения (5), имеют вид

$$\frac{\partial \Psi}{\partial N} = - \frac{n^2 N \cos \Phi \sin^2 \Phi}{\alpha (N^2 \cos^2 \Phi - n^2 \sin^2 \Phi \cos 2\Phi)}, \quad (15)$$

$$\frac{\partial \Psi}{\partial \Phi} = \frac{n^2 \sin^2 \Phi (2N^2 \cos 2\Phi - n^2 \sin^2 \Phi)}{\alpha (N^2 \cos^2 \Phi - n^2 \sin^2 \Phi \cos 2\Phi)}. \quad (16)$$

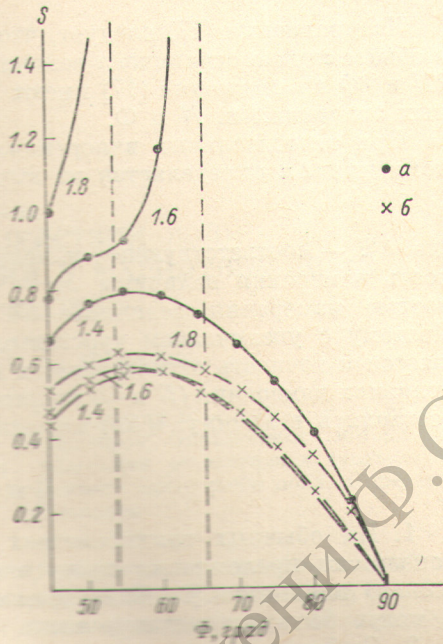


Рис. 4. Зависимость чувствительности метода от угла падения для модельных сред (их показатели преломления указаны на графике) для эталона из плавленного кварца (а) и граната (б).

Таким образом, с учетом соотношений (12)÷(16) уравнение (11) можно записать в виде

$$\delta n = |S^{-1}| \delta \Psi + \frac{n^2}{N} \delta N + \frac{n^2}{N^2} |4N^2 \operatorname{ctg} 2\Phi - n^2 \operatorname{tg} \Phi| \delta \Phi. \quad (17)$$

Из уравнения (17) следует, что при абсолютных измерениях точность в общем случае ограничена величинами δN и $\delta \Phi$, так как множители при δN и $\delta \Phi$ в выражении (17) имеют величины порядка единицы при реальных значениях n , N и Φ .

При относительных измерениях величина изменения показателя преломления Δn определяется из выражения

$$\Delta n = S^{-1} \Delta \Psi, \quad (18)$$

где $\Delta \Psi$ — соответствующее изменение величины Ψ . Следовательно, точность измерения величины Δn — $\delta(\Delta n)$ — определяется только погрешностью измерения величины $\Delta \Psi$ — $\delta(\Delta \Psi)$ — и чувствительностью S . Поэтому с увеличением чувствительности метода соответственно повышается и точность относительных измерений. При правильно выбранных условиях измерения (N и Φ) погрешность относительных измерений может составлять величину $\delta(\Delta n)$ порядка $1 \cdot 10^{-4}$.

Выводы

1. На обычных эллипсометрах можно проводить точные измерения показателя преломления прозрачной среды по величине эллипсометрического параметра Ψ . Измерения отличаются простотой, экспрессностью и могут быть автоматизированы.
2. Выбирая эталон и угол падения из условия $n \sin \Phi \rightarrow N$, можно добиться очень высокой чувствительности метода.
3. Погрешность абсолютных измерений показателя преломления среды ограничена погрешностями, с которыми определены величины N и Φ . При относительных измерениях точность измерений может быть очень высокой, причем она повышается с увеличением чувствительности метода S .
4. Метод может быть полезен, например, при исследовании зависимости свойств жидкостей (в том числе растворов, расплавов, фоторезистов, био-препаратов и т. д.) от различных факторов (время, температура, давление, состав и т. д.).

Литература

[1] М. М. Горшков. Эллипсометрия. «Советское радио», М., 1974.

Поступило в Редакцию 12 апреля 1977 г.