

поверхности чистой жидкости под вакуумом, т. е. находящейся в равновесии со своим паром, имеется моно- или бимолекулярный слой ориентированных молекул, что и создаёт эллиптичность ($b/a \sim 10^{-3}$). Для открытой поверхности на это указал ещё Р. Рэлей (R. Rayleigh, 1882) и А. Буэ (A. Bouhet, 1931). Теории возникновения эллиптичности для тонких слоёв металлов см. в [6]; для моно-, бимолекулярных и подобных им слоёв также разработаны нек-рые теоретич. подходы [2, 3, 7].

Преимуществом Э. отражения является возможность исследования именно поверхностных слоёв, недостатком — трудности неизбежно косвенного определения свойств в объёме.

Эллипсометры. Существует большое разнообразие их конструкций [2]. Источник света, как правило, — лазер, приёмник — фотоэлектрический. Принципиальная схема нек-рых вариантов дана на рис. 2. В одном из них падающий свет поляризован линейно (линейный поляризатор П), в отражённом луче эллиптически поляризованный свет компенсатором оптическим К превращается (подбором

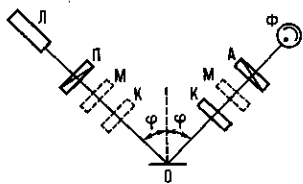


Рис. 2. Принципиальная схема эллипсометра: Л — лазер; Ф — фотоэлектрический приёмник света; П — поляризатор; А — анализатор; К — компенсатор; М — модулятор света.

ориентации и разности фаз компенсатора) в поляризованный линейно, азимут колебаний к-рого определяется линейным анализатором А по погашению сигнала в приёмнике. В др. варианте (пунктир) падающий свет поляризован эллиптически, а параметры эллипса устанавливаются так, чтобы после отражения поляризация была линейной и сигнал гасился А (нулевые схемы). В др. конструкциях в обоих вариантах добиваются в отражении циркулярной поляризации, получение к-рой устанавливается по неизменности сигнала при вращающемся анализаторе.

Обычно для повышения точности измерений используется модуляция света (напр., небольшим качением плоскости поляризации) с помощью пьезооптич., электрооптич. или магнитооптич. модуляторов света.

Иногда параметры эллипса меняют изменением угла падения. Часто в приборах предусматривается сканирование по длинам волн. В 90-х гг. разработаны нелинейные эллипсометры, в к-рых мощная накачка создаёт в среде нелинейные эффекты, а слабый пробный луч используется для эллипсометрич. измерений.

Методы отражат. Э. применяются для исследования веществ с большим поглощением (металлы, полупроводники), ибо исследования в таких слоях, к-рые ещё дают пропускание (для металлов — 10—50 нм), в силу структурных особенностей таких слоёв не дают сведений о свойствах в объёме. Особенно широко исследуются тонкие слои — эпитаксиальные слои, слои окислов, адсорбционные и адгезионные, слои, создаваемые ионной имплантацией, всякого рода металлич. и диэлектрич. покрытия и т. д. Разработаны методы исследования кинетики роста слоёв и плёнок; Э. даёт возможность контроля непосредственно в течение процесса.

Э. пропускания основана на тех же принципах — измерении параметров эллипса прошедшего через вещество света (при полной поляризации). В Э. пропускания практически не выделяется влияние поверхностных слоёв на фоне влияния основной толщи; она применяется для измерения оптич. параметров слабо поглощающих кристаллов, для измерения естеств. и магн. вращения плоскости поляризации, естеств. и магн. кругового дихроизма, поскольку для этих параметров теория отражения слабо разработана и трудна

для вычислений, и измерения по отражению дают малую точность. Для таких измерений чаще используются *поляриметры* и *рефрактометры*. Приборы для Э. пропускания чаще наз. кристалло-рефрактометрами, дихрографами и др. Существует термин «Э. рассеяния» — измерение частичной поляризации света при прохождении мутных сред, аэрозолей, коллоидов — однако он малоупотребителен.

Лит.: 1) Борн М., Вольф Э., Основы оптики, 2 изд., М., 1973; 2) Аззам Р., Башара Н., Эллипсометрия и поляризованный свет, пер. с англ., М., 1981; 3) Кизель В. А., Отражение света, М., 1973; 4) Горшков М. М., Эллипсометрия, М., 1974; 5) Федоров Ф. И., Оптика анизотропных сред, Минск, 1958; 6) Розенберг Г. В., Оптика тонкослойных покрытий, М., 1958; 7) Основы эллипсометрии, Новосиб., 1979; 8) Rotter L., Kaeser D., Polarimetry of inhomogeneous films of anisotropic crystallites: birefringence in BaTiO₃ thin films, «J. Opt. Soc. Amer.», 1995, v. 12, № 5, p. 999.

В. А. Кизель.

ЭЛЛИПТИЧЕСКИЕ ФУНКЦИИ — функции, связанные с обращением *эллиптических интегралов* (более строгое определение см. ниже). Подобно тому как простейшая тригонометрич. ф-ция $u = \sin x$ является обратной по отношению к интегралу

$$x = \int_0^u \frac{d\tau}{\sqrt{1-\tau^2}},$$

так одна из Э. ф. Якоби $u = \operatorname{sn}(x; k) = \operatorname{sn} x$ является обратной по отношению к эллиптич. интегралу I рода

$$x = \int_0^u \frac{d\tau}{\sqrt{(1-\tau^2)(1-k^2\tau^2)}} \quad (1)$$

(k — постоянная, наз. модулем). Чтобы определить остальные Э. ф. Якоби, заменяют в (1) τ на $\sin \alpha$ и получают

$$x = \int_0^{\varphi} \frac{d\alpha}{\sqrt{1-k^2 \sin^2 \alpha}} \quad (\sin \varphi = u).$$

Ф-ция, обратная x , наз. амплитудой и обозначается $\varphi = \operatorname{am} x$ (она не является Э. ф.); через неё $\operatorname{sn} x$ выражается так:

$$\operatorname{sn} x = \sin \varphi = \sin \operatorname{am} x$$

и потому наз. синусом амплитуды или эллиптическим синусом. Две другие Э. ф. Якоби — косинус амплитуды (или эллиптич. косинус) и дельта амплитуды:

$$\operatorname{cn} x = \cos \varphi = \cos \operatorname{am} x,$$

$$\operatorname{dn} x = \sqrt{1-k^2 \sin^2 \varphi} = \Delta \operatorname{am} x.$$

Все эти ф-ции были введены и изучены Н. Абелем (N. Abel, 1827) и К. Якоби (C. Jacobi, 1829). Ф-ции $\operatorname{sn} x$, $\operatorname{cn} x$, $\operatorname{dn} x$ связаны двумя алгебраич. соотношениями:

$$\begin{aligned} \operatorname{sn}^2 x + \operatorname{cn}^2 x &= 1, \\ k^2 \operatorname{sn}^2 x + \operatorname{dn}^2 x &= 1. \end{aligned}$$

На рис. 1 представлен вид графиков Э. ф. Якоби для вещественного x (при условии $0 < k < 1$); здесь

$$K = \int_0^1 \frac{d\tau}{\sqrt{(1-\tau^2)(1-k^2\tau^2)}}$$

— полный эллиптич. интеграл I рода и $4K$ — основной период Э. ф. $\operatorname{sn} x$. В отличие от однопериодич. ф-ции $\sin x$,

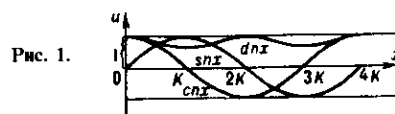


Рис. 1.