

К ТЕОРИИ ЭЛЛИПСОМЕТРИИ РЕАЛЬНОЙ ПОВЕРХНОСТИ

© 2008 г. **И. С. Гайнутдинов***, доктор техн. наук; **Е. А. Несмелов***, доктор физ.-мат. наук;
Р. Г. Шаймарданов*; **В. А. Иванов***; **А. В. Михайлов****, канд. техн. наук

* НПО “Государственный институт прикладной оптики”, г. Казань

** НПК “Государственный оптический институт им. С.И. Вавилова”, Санкт-Петербург

В работе рассмотрен вопрос о неправомерности описания шероховатости поверхности эффективным слоем в случае эллипсометрических измерений. Показано, что остаточный сигнал эллипсометра определяется рассеянием излучения на измеряемой поверхности.

Коды OCIS: 260.2130.

Поступила в редакцию 24.07.2007.

Вопросы эллипсометрии шероховатой поверхности поднимались в литературе неоднократно [1–4]. В качестве основной модели для определения влияния шероховатости на наблюдаемые оптические свойства поверхности предлагалось введение некоторого слоя с эффективными оптическими свойствами, определяющего потери на рассеяние [5, 6]. При этом вопрос о правомерности введения такого слоя оставался в тени, так как введение эффективного слоя, учитывающего шероховатость поверхности, кажется, на первый взгляд, очевидным. Однако именно этот вопрос при исследовании проблемы необходимо ставить и решать в первую очередь. В данной работе рассматривается вопрос о правомерности использования эффективного слоя для описания свойств шероховатой поверхности.

Для описания свойств измеряемой поверхности обычно используется основное уравнение эллипсометрии в виде

$$\frac{r_p}{r_s} = \operatorname{tg} \psi e^{i\Delta}, \quad (1)$$

где r_p – амплитудное отражение p компонента поляризации, r_s – амплитудное отражение s компонента поляризации, ψ , Δ – измеряемые эллипсометрические параметры. Уравнение (1) получено для идеально плоской поверхности и очевидно, что его можно использовать в том случае, когда интенсивность сигнала эллипсометра точно обращается в нуль. В случае измерения эллипсометрических параметров ψ и Δ на шероховатой поверхности это не так. При проведении измерений на шероховатых поверхностях полного гашения сигнала не происходит, а достигается только некоторый минимум сигнала, и в большинстве случаев это обстоятельство просто связывают с шумами электроники и не рассматривают, считая, что полученный минимум и есть условие полного гашения.

Более правильно и точно оценка шероховатости исследуемой поверхности проводится по величине сигнала диффузного отражения [7–11]. Измере-

ние диффузного отражения позволяет легко оценивать параметры шероховатости поверхности. При этих измерениях находится интегральное значение диффузного отражения, т. е. включается почти вся индикатриса за исключением интервала углов, близких к зеркальному отражению. На интегральном значении диффузного отражения это обстоятельство сказывается незначительно, хотя максимальное значение диффузного отражения достигается именно в этом интервале углов, но, так как исключаемый интервал углов мал, общий вклад от него также оказывается малым. При эллипсометрических измерениях на шероховатой поверхности рассматривается отражение в зеркальном направлении и при этом захватывается только очень малый интервал углов вблизи от зеркального отражения. Это означает, что при эллипсометрических измерениях также должно появляться диффузное отражение, которое должно быть учтено в уравнении для определения параметров исследуемой поверхности. В реальных условиях эллипсометрических измерений сигнал на фотоприемнике оказывается минимальным, но не нулевым, т. е. сохраняется некоторый остаточный сигнал, который обычно относят к шумам прибора и игнорируют при проведении расчетов, что и позволяет использовать уравнение (1). Рассмотрим ситуацию подробнее. В целях упрощения мы будем рассматривать идеальный эллипсометр со схемой поляризатор–компенсатор–измеряемый образец–анализатор. По этой схеме построен серийный эллипсометр ЛЭФ-3М. Для описания преобразования светового пучка в эллипсометре используем матрицы Джонса [12]

$$\begin{pmatrix} E_p^1 \\ E_s^1 \end{pmatrix} = \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{pmatrix} \cos^2 a & \sin a \cos a \\ \sin a \cos a & \sin^2 a \end{pmatrix} \times \\ \times \begin{pmatrix} R_{11} & R_{12} \\ R_{21} & R_{22} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & i \\ i & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \cos^2 p & \sin p \cos p \\ \sin p \cos p & \sin^2 p \end{pmatrix} \begin{pmatrix} E_p^0 \\ E_s^0 \end{pmatrix}. \quad (2)$$

Здесь E_p^0 и E_s^0 – амплитудные значения световой волны соответствующей поляризации на входе в эллип-

сометр, а E_p^1 и E_s^1 – амплитудные значения световой волны на выходе из эллипсометра, a – угол поворота анализатора, p – угол поворота поляризатора, быстрая ось компенсатора повернута на 45° . Матричные элементы отражающей системы $R_{11} = R_p + \rho_{pp}$, $R_{12} = \rho_{ps}$, $R_{21} = \rho_{sp}$, $R_{22} = R_s + \rho_{ss}$, где R_p – амплитудный коэффициент зеркального отражения для p -компонента поляризации, R_s – амплитудный коэффициент зеркального отражения для s -компонента поляризации, ρ_{ij} – амплитудные коэффициенты диффузного отражения для соответствующих компонентов поляризации. Появление перекрестных членов ρ_{sp} и ρ_{ps} происходит за счет дифракции на наклоне шероховатостей подложки. Для поверхностей оптического качества длина корреляции шероховатости достаточно велика и, следовательно, наклоны малы, что означает малость величин ρ_{sp} и ρ_{ps} по сравнению с величинами ρ_{pp} и ρ_{ss} соответственно.

Из (2) легко получается выражение для интенсивности света, прошедшего через эллипсометр, с учетом того, что световые волны, отраженные зеркально, не когерентны волнам, отраженным диффузно,

$$J(a, p) = \frac{1}{4}(L + \delta L)J(0), \quad (3)$$

где

$$L = R_p^2 + R_s^2 + (R_p^2 - R_s^2) \cos 2a + 2R_p R_s \sin 2a \sin(\Delta + 2p), \quad (4)$$

$$\delta L = \rho_{pp}^2 + \rho_{sp}^2 + \rho_{ps}^2 + \rho_{ss}^2 + (\rho_{pp}^2 + \rho_{ps}^2 - \rho_{sp}^2 - \rho_{ss}^2) \cos 2a. \quad (5)$$

Выделение слагаемых в (3) проведено по принципу когерентных и некогерентных слагаемых. Более правильно разбиение

$$L = R_p^2 + R_s^2 + (R_p^2 - R_s^2 + \rho_{pp}^2 + \rho_{ps}^2 - \rho_{sp}^2 - \rho_{ss}^2) \cos 2a + 2R_p R_s \sin 2a \sin(\Delta + 2p), \quad (6)$$

$$\delta L = \rho_{pp}^2 + \rho_{ps}^2 + \rho_{sp}^2 + \rho_{ss}^2. \quad (7)$$

В этом случае видно, что для определения параметра ψ должна возникнуть поправка от диффузного отражения, а остаточный сигнал полностью определяется диффузным отражением.

Таким образом, сигнал эллипсометра состоит из двух слагаемых, первое из которых определяется известным уравнением эллипсометрии, а второе, определяемое диффузным отражением от исследуемой поверхности, представляет остаточный сигнал, связанный только с шероховатостью поверхности. Из (3) можно сделать два важнейших вывода. Во-пер-

вых, шероховатость поверхности не может быть определена неким эффективным слоем, так как фаза Δ определяется только первым слагаемым и полностью независима от величины шероховатости поверхности. Любое определение эффективного слоя приводит к изменению двух эллипсометрических параметров ψ и фазы Δ в выражении (1), т. е. к неоправданному искажению оптических свойств поверхности. Так как второе слагаемое зависит от угла поворота анализатора, то, по всей вероятности, можно считать, что второе слагаемое дает некоторую поправку в определение параметра ψ , но не затрагивает при этом фазу Δ . Именно по этой причине и не может быть введен эффективный слой, характеризующий шероховатость поверхности. Следует отметить, что при введении поверхностной проводимости [13–17], характеризующей потерю на рассеяние, возможно моделирование шероховатой поверхности, так как в этом случае все поправки включаются только в параметр ψ и не затрагивают параметр Δ .

Во-вторых, по величине остаточного сигнала в эллипсометрических измерениях можно судить о шероховатости поверхности, т. е. о ее оптическом качестве, и при необходимости можно сделать оценку шероховатости, которую можно связать с поверхностной проводимостью [16, 17]. Этот вывод интересен по той причине, что эллипсометр является стандартным оптическим прибором и эллипсометрические измерения хорошо регламентированы. Подобного прибора для оценки шероховатости полированных поверхностей не существует. Оценка шероховатости полированной поверхности делается по данным измерения диффузного отражения [7], но при этом нельзя говорить о каком-либо стандартном приборе с полностью регламентированным процессом проведения измерения. Необходимо оговориться, что измерение диффузного отражения, проводящееся обычно в интегрирующей сфере, предусматривает интегрирование по всем углам за исключением области вблизи направления зеркального отражения. Считается [8, 9], что ошибка, возникающая при этих измерениях, достаточно мала. В случае эллипсометрических измерений, в отличие от предыдущего случая, остаточный сигнал создается диффузным отражением в области углов, соответствующих направлению зеркального отражения, т. е. соответствие тех и других измерений не является полным. Результат измерения диффузного отражения в интегрирующей сфере зависит от формы индикатрисы и размера отверстия связи в сфере. При измерении на эллипсометре величина и форма индикатрисы не имеют значения, так как измеряется только отражение в малой области углов в направлении зеркального отражения, но при этом

измеряется максимальное значение распределения диффузного отражения, выпадающее при измерении в интегрирующей сфере. Следуя [18, 19], для оптических поверхностей, имеющих малую шероховатость, можно записать

$$\rho_{pp}^2 = \left(\frac{2\pi\sigma}{\lambda} \right)^2 R_p^2, \quad (8)$$

$$\rho_{ss}^2 = \left(\frac{2\pi\sigma}{\lambda} \right)^2 R_s^2, \quad (9)$$

$$\rho_{sp}^2 = \rho_{ps}^2 = 0.$$

Здесь σ – среднегеометрическая шероховатость поверхности, λ – длина волны, на которой проводятся измерения последнее равенство следует из изотропности и однородности оптической поверхности [20, 21]. Подставляя эти значения в (6), (7) и (3), получим

$$\left(1 + \frac{4\pi^2\sigma^2}{\lambda^2} \right) \operatorname{tg}2a = \operatorname{tg}2\psi. \quad (10)$$

Так как среднегеометрическая шероховатость оптической поверхности мала и $\sigma/\lambda \ll 1$, то поправкой в (10) можно пренебречь и считать, что уравнение (1) остается в этом случае полностью справедливым. Остаточный сигнал

$$J_{\text{ост}} = (R_p^2 + R_s^2) \left(\frac{2\pi\sigma}{\lambda} \right)^2, \quad (11)$$

т. е. полностью определяется рассеянием излучения на поверхности. При этом поверхностную проводимость можно определить по [21], т. е. включить шероховатость поверхности в определение коэффициентов отражения. Это определение практически не отличается от [13–17] и только уточняется по своему детальному выражению.

Для экспериментальной проверки полученных выводов мы провели измерения на медных зеркалах диаметром 30 мм, полученных точением алмазным резцом ИР-227 на станке МК-6513 заготовки из меди марки МОБ. Выбор металлической поверхности для проведения измерений диктовался тем обстоятельством, что в случае сильно поглощающего металла рассеянное излучение (остаточный сигнал эллипсометра) может возникать только на рабочей поверхности, т. е. исключаются любые другие источники и, в частности, нарушенный слой. Выбор именно медной поверхности для проведения измерений диктовался сравнительно медленным процессом окисления поверхности, т. е. возможностью игнорировать окисные слои на поверхности зеркала. Так как при любой тщательности проведения процесса точения шероховатость по-

верхности остается регулярной (следы алмазного резца), то нами была проведена ее “хаотизация”, которая заключалась в слабом окислении поверхности с последующим протравливанием. Травление медной поверхности осуществлялось в специальном растворе на основе гидроксидов солянокислого, бензотриазола, этанола и ацетона. Последующая отмывка от продуктов реакции проводилась в ацетоне с применением ультразвука. При этом происходит не только очистка поверхности меди, но и ее пассивация за счет бензотриазола. Повторяя этот процесс несколько раз, мы практически исключили следы резца и получили поверхность с однородным почти гауссовым распределением шероховатости. Оценка шероховатости поверхности нами проводилась по данным диффузного отражения, равного 0,0055 (на стенде ИРС-1 [22, 23]), при измерении десяти точек на поверхности. Проведенные измерения показали, что среднегеометрическая шероховатость полученных поверхностей была равна 35 Å.

При измерениях на эллипсометре ЛЭФ-3М при максимальном гашении остаточный сигнал имел значение 0,0025 $J(0)$. Калибровка этого сигнала была проведена с помощью набора нейтральных фильтров, пропускание которых было измерено на спектрофотометре Cary-5000 на рабочей длине волны эллипсометра (6328 Å). В пределах погрешности измерений и с учетом всех необходимых множителей для перехода от интегрального рассеяния в полусферу, при нормальном падении зондирующего излучения на измеряемую поверхность, к случаю диффузного сигнала в направлении зеркального отражения, при падении излучения под углом, остаточный сигнал эллипсометра совпал со значением диффузного рассеяния, полученным на стенде ИРС-1.

Все эллипсометрические измерения проводились также в 10 точках исследуемой поверхности при углах падения 50°, 60° и 70°. Найденные из эллипсометрических измерений медных поверхностей значения оптических постоянных меди $n = 0,13$ и $k = 3,11$ близки к данным [24]. Согласие по значению k можно улучшить введением поверхностной проводимости [14–17, 21].

ЛИТЕРАТУРА

1. Аззам Р., Башара Н. Эллипсометрия и поляризованный свет. М.: Мир, 1981.
2. Ржанов А.В. и др. Основы эллипсометрии. Новосибирск: Наука, 1979. 422 с.
3. Горшков М.М. Эллипсометрия. М.: Советское радио, 1974.
4. Пшеницын В.И., Абаев М.И., Лызлов Н.Ю. Эллипсометрия в физико-химических исследованиях. Л.: Химия, 1986.

5. Рожнов Г.В. Нелокальный тензор эффективной диэлектрической проницаемости шероховатой границы раздела однородных изотропных сред // ЖЭТФ. 1990. Т. 98. № 5(11). С. 1737–1747.
6. Carniglia C.K., Jensen D.G. Single-layer model for surface roughness // Appl. Opt. 2002. V. 41. № 16. P. 3167–3171.
7. Несмелов Е.А., Мухамедов Р.К., Афанасьева А.Г., Матшина Н.П. Фотометрический способ определения высоты шероховатостей поверхности оптически прозрачных плоских деталей // Авт. свид. № 872959. СССР.
8. Топорец А.С. Отражение света шероховатой поверхностью // ОМП. 1979. № 1. С. 34–46.
9. Мазуренко М.Н., Скрелин А.Л., Топорец А.С. Фотометрический метод определения шероховатости непрозрачной поверхности // ОМП. 1979. № 11. С. 1.
10. Войшвилло Н.А., Лазарев В.П. Фотоэлектрический фотометр для контроля светорассеяния плоских зеркал с наружным покрытием // ОМП. 1956. № 2. С. 27–29.
11. Борисов А.Н., Гайнутдинов И.С., Панасенко Б.В., Карпюк Г.М. Рассеяние излучения многослойными интерференционными покрытиями // Аналитический обзор за 1975–1988 гг. № 5142. Москва, 1990. С. 3–26.
12. Джеррард А., Берч Дж.М. Введение в матричную оптику. М.: Мир, 1978.
13. Силин В.П. К вопросу об оптических постоянных проводников // ЖЭТФ. 1959. Т. 36. В. 5. С. 1443–1450.
14. Ван Си-фу, Силин В.П., Фетисов Е.П. Об оптических свойствах металлических пленок в области аномального скин-эффекта // Опт. и спектр. 1959. Т. 7. В. 4. С. 547–551.
15. Силин В.П., Рухадзе А.А. Электромагнитные свойства плазмы и плазмopodobных сред. М.: Атомиздат, 1961. 244 с.
16. Троицкий Ю.В. Многолучевые интерферометры отраженного света. Новосибирск: Наука, 1985. 207 с.
17. Троицкий Ю.В. Проводящая поверхность как модель для описания потерь на границах слоев диэлектрического многослойника // Опт. и спектр. 1988. Т. 64. В. 1. С. 140–146.
18. Топорец А.С. Оптика шероховатой поверхности. Л.: Машиностроение, 1988. 168 с.
19. Рогаткин Д.А. Рассеяние электромагнитных волн на случайно-шероховатой поверхности как граничная задача взаимодействия лазерного излучения со светорассеивающими материалами и средами // Опт. и спектр. 2004. Т. 97. № 3. С. 484–493.
20. Рожнов Г.В. Дифракция электромагнитных волн на шероховатой границе раздела однородных изотропных сред // Изв. вузов. Радиофизика. 1989. Т. 32. № 4. С. 451–460.
21. Рожнов Г.В. Рассеяние электромагнитных волн статистически неровными поверхностями // ЖЭТФ. 1988. Т. 94. В. 2. С. 50–63.
22. Борисов А.Н. Зеркала с малыми потерями и управляемой фазовой анизотропией // Автореф. дис. канд. техн. наук. Санкт-Петербург, 1995.
23. Гайнутдинов И.С., Несмелов Е.А., Борисов А.Н., Михайлов А.В. Оценка качества поверхности подложек для нанесения интерференционных покрытий // Оптический журнал. 2002. Т. 69. № 12. С. 68–75.
24. Landolt-Börnstein V. Metals: Electronic Transport Phenomena, Subvolume b. Springer-Verlag, 1985.