

СДВИГ ФАЗЫ ПРИ ОТРАЖЕНИИ СВЕТА ТОНКИМИ ПЛЁНКАМИ

За последние годы всё большее и большее применение находят себе плёнки (особенно металлические), толщина которых исчисляется немногими десятками или сотнями ангстрем. В связи с этим, главным образом в связи с применением таких плёнок в интерференционных светофильтрах и в целях изучения микрорельефа поверхностей методами многолучевой интерференции, весьма актуальной становится задача изучения оптических свойств тонких плёнок.

Сравнительно немногочисленные пока непосредственные измерения показателя преломления различных веществ в тонких плёнках, так же как и практика изготовления интерференционных светофильтров, показали, что оптические свойства вещества, нанесённого на подстилающую поверхность в виде тонкой плёнки, существенно отличаются от оптических свойств того же вещества в массивных образцах. Причём здесь мы имеем дело отнюдь не с тривиальными эффектами, обусловленными наличием весьма близко расположенных друг к другу поверхностей раздела, а с реальным изменением эффективных оптических констант самой плёнки. При уменьшении толщины плёнки ниже некоторого, характерного для данного вещества предела наблюдается, вообще говоря, резкое возрастание как действительной, так и мнимой части эффективного показателя преломления. В некоторых случаях наблюдается даже изменение знака разности между фазовой скоростью света в плёнке и в вакууме (наступающее для серебряных плёнок при толщине $30 \text{ \AA}$)¹. Как степень, так и характер наблюдаемых изменений в высокой степени зависят от толщины плёнки. Высказывалось предположение², что в таких плёнках имеет место действительное изменение оптических констант самого вещества, образующего плёнку, обусловленное его структурными изменениями по мере увеличения толщины плёнки. Так, например, электронографические измерения показали, что плёнки SiO_2 , ZnS и MgF_2 , имеющие толщину менее $1000 \text{ \AA}$, аморфны³.

Однако, недавние исследования структуры тонких металлических плёнок различной природы и на различных стадиях их образования, проведённые с помощью электронного микроскопа и другими методами^{3,4}, если не полностью опровергают такое предположение, то во всяком случае выдвигают на первый план иные причины. Эти исследования наглядно показали, что в весьма тонких слоях вещество, образующее плёнку, не распределяется по подстилающей поверхности равномерно, а образует отдельные, изолированные друг от друга частицы, размеры и форма которых определяются, повидимому, характером поверхностных сил. По мере возрастания количества осадка отдельные частицы начинают образовывать аггломераты и постепенно гранулированная структура покрытияступает место структуре пористой, напоминающей по внешнему виду губку. При этом значительная часть подстилающей поверхности остаётся ещё совершенно свободной от покрытия. Только при более значительных толщинах осаждённого слоя происходит, повидимому, его перестройка и образование однородной поликристаллической плёнки. Интересно отметить, что такое преобразование строения плёнки в процессе её роста связано не только с изменением её оптических свойств (например, коэффициента отражения и его зависимости от длины волны³), но и с изменением её электрических свойств — удельное сопротивление металлических плёнок в 10^3 — 10^7 раз больше удельного сопротивления тех же металлов в массивных образцах⁵.

Таким образом, при малой толщине осаждённого слоя он не представляет собой однородной плёнки и с оптической точки зрения должен рассматриваться как мутная среда (отметим, что размеры неоднородностей значительно меньше длины световой волны).

Следовательно, нет убедительных оснований для предположения о действительном изменении оптических констант самого вещества при образовании им тонких плёнок. Напротив, наблюдаемые изменения эффективных оптических констант слоя могут быть, повидимому, отнесены за счёт изменения роли и характера рассеяния света на неоднородной гранулированной или пористой структуре плёнок.

Однако измерения в проходящем или отражённом свете не могут дать критерия для различения обоих эффектов — когерентное рассеяние света неоднородностями структуры в направлении проходящего или отражённого луча, ведущее к фазовым сдвигам в этих лучах, оказывается полностью эквивалентным изменению эффективных оптических констант однородной среды.

Вопрос о наличии или отсутствии действительных изменений оптических свойств вещества, образующего тонкую плёнку, в зависимости от толщины этой плёнки, может быть решён только на основе исследования рассеяния света в тонких плёнках (таких исследований, повидимому, ещё не проводилось), а также структурного анализа самих плёнок. Тем не

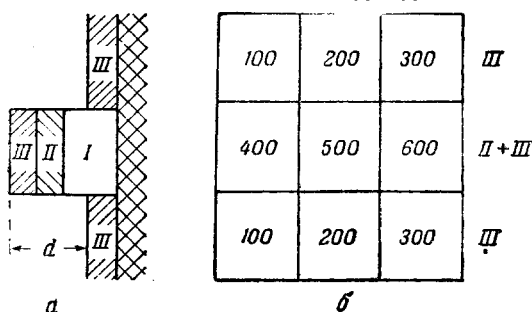


Рис. 1. Схема расположения покрытий на зеркале интерферометра Фабри-Перро при исследовании серебряных слоёв. а — в разрезе, б — в плане.

I — слой MgF_2 толщиной около $1000 \text{ \AA}$, II — слой Ag толщиной около $300 \text{ \AA}$, III — слой Ag переменной толщины.

Цифрами указана полная толщина слоя серебра (II + III) в ангстремах.

В первом случае исследуемые слои наносились на одно из зеркал интерферометра Фабри-Перро.

Для нанесения слоёв использовалась техника испарения в высоком вакууме, причём были приняты специальные меры для обеспечения и контроля равномерности покрытия на всём его протяжении. Взаимное расположение отдельных участков покрытия показано на рис. 1. Сначала наносился сравнительно толстый слой MgF_2 (слой I), назначением которого было увеличить расстояние d (см. рис. 1) до удобной для измерений величины. Затем наносился слой серебра II, толщина которого подбиралась с таким расчётом, чтобы она обеспечивала практически полную непрозрачность слоя. Затем наносился второй слой серебра III, оптические свойства которого и измерялись. Такое расположение слоёв выбиралось из соображений необходимости исключить влияние толщины слоя на разность хода интерферирующих лучей (расстояние d не зависит от толщины слоя III). Скачок фазы при отражении от участка слоя II, наложенного

менее выяснение фазовых соотношений в свете, отражаемом тонкими плёнками, и их зависимости от толщины плёнки, а также сопоставление их с предсказаниями теории, основанной на представлении об однородности плёнки и неизменности оптических констант вещества, имеет не только практический интерес. Такого рода исследование и проведено авторами реферируемой работы⁶.

Авторы исследовали зависимость величины фазового сдвига при отражении как с лицевой, так и с оборотной (обращённой к подстилающей поверхности) стороны плёнки.

на слой *III*, также не зависит от толщины слоя *III*. (Для непрозрачного слоя скачок фазы $\psi = 30,3^\circ$ и не зависит от толщины слоя.) Поэтому измерение разности фаз лучей, отражённых от участка *II + III* и от участка *III*, в функции толщины слоя *III* давали непосредственную возможность определения сдвига фазы при отражении от слоя *III* в функции его толщины.

Результаты измерений были сопоставлены с теоретическими расчётами, проведёнными в предположении однородности слоя и с учётом отражений от нижней его границы. Оказалось, что для слоёв серебра, толщина которых превышает 200 Å, наблюдается достаточно хорошее совпадение с теорией. (При толщинах, превышающих 400 Å, скачок фазы практически совпадает со значением, соответствующим полностью непрозрачному слою.) Если же толщина слоя серебра меньше 200 Å, то совпадение с теорией нарушается и одновременно появляются иррегулярные изменения в скачке фазы от образца к образцу и по мере старения образца (от недели к неделе).

Результат этот имеет серьёзное значение для измерений микроструктуры поверхностей методом многолучевой интерференции, когда исследуемая поверхность для получения интерферометра покрывается слоем серебра.

Аналогичным методом исследовался скачок фазы при отражении от тонких слоёв диэлектрика, осаждённых на почти прозрачном серебряном слое.

Метод осаждения плёнок оставался тем же.

Схема взаимного расположения отдельных участков покрытия показана на рис. 2. Первоначально наносился непрозрачный слой серебра *I*, толщиной около 600 Å, затем слой диэлектрика *II* переменной толщины и, наконец, слой серебра *III*, толщиной также около 600 Å. Измерения разности фаз отражённых лучей 1 и 2 (рис. 2) давали возможность отражённых лучей 3 и 4 — эффективную опти-определить геометрическую толщину слоя диэлектрика, а измерения разности фаз чeskую толщину этого слоя. Исследованию были подвергнуты плёнки из ZnS, MgF₂, криолита и CaF₂. Для MgF₂ и криолита экспериментально определённые значения в широком диапазоне толщин слоя (примерно от 500 до 5000 Å) хорошо ложатся на теоретические кривые. Из этого можно сделать заключение, что в исследованном интервале толщин эти вещества образуют однородную плёнку. Напротив, для ZnS₂ совпадение экспериментальных данных с теоретической кривой довольно плохое. Особенно большое число измерений было в этом случае проделано для толщин в интервале от 500 до 1200 Å. Они с несомненностью показывают на наличие значительных систематических отступлений от теоретической кривой для толщин, меньших 1000 Å. Что касается CaF₂, то авторы ограничиваются указанием значений эффективного показателя преломления: в массивном образце $n = 1,43$, для слоёв тоньше 3000 Å $n = 1,27$, для слоёв толщиной 40 000 Å $n = 1,23$.

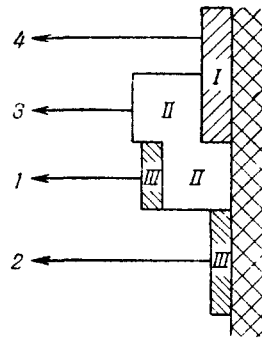


Рис. 2. Схема расположения покрытий на зеркале интерферометра Фабри-Перро при исследовании диэлектрических плёнок.

I — непрозрачный слой серебра толщиной около 600 Å, *II* — слой исследуемого диэлектрика, *III* — слой серебра.

Считая это свидетельством высокой степени пористости слоёв этого вещества, авторы оговаривают, что исследование слоёв CaF_2 продолжается.

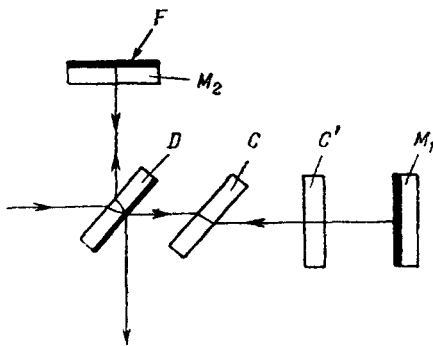


Рис. 3. Схема интерферометра для измерения сдвига фазы при отражении от оборотной стороны плёнки.

D — полупрозрачная пластинка, C — компенсатор, M_1 — зеркало, F — исследуемая плёнка, M_2 — подстилающая стеклянная пластинка, C' — компенсирующая стеклянная пластинка, тождественная с M_2 (слегка повернута относительно луча во избежание отражений).

Следующая серия измерений авторов относится к сдвигу фазы при отражении от оборотной стороны тонких слоёв серебра и золота, нанесённых на стеклянную пластинку. Для этого использовался интерферометр

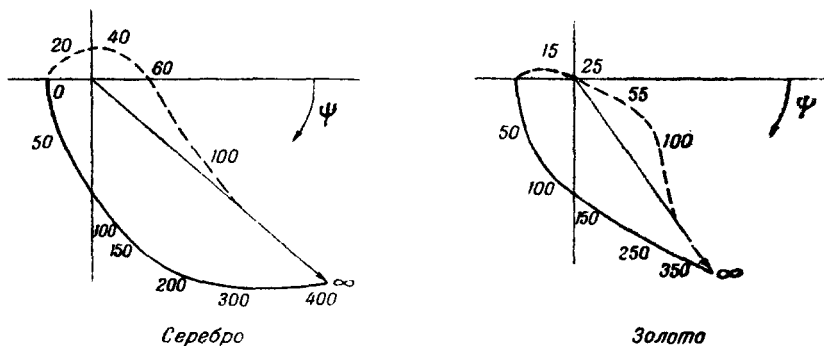


Рис. 4. Вычисленные и измеренные значения сдвига фазы при отражении от оборотной стороны слоя. Сдвиг фазы ψ изображается углом между осью абсцисс и радиусом-вектором, проведённым из начала координат в данную точку кривой (соответствующую данной толщине слоя). Длина радиуса-вектора пропорциональна интенсивности отражённого света. Цифры указывают толщину слоя в Å. Сплошная кривая — вычисления; пунктирная — измерения.

Майкельсона (рис. 3). На рис. 4 приведены результаты измерений. Как видно из рисунка, действительный сдвиг фазы резко отличается от пред-

писываемого теорией, основанной на представлении об однородности слоя и неизменности констант.

Обращает внимание не только возрастание расхождений по мере уменьшения толщины слоя (при толщинах $\gtrsim 400$ Å они отсутствуют), но и взаимно обратный характер предсказанного и наблюдаемого при этом изменения сдвига фазы. При некоторой малой толщине слоя (около 60 Å для серебра и 25 Å для золота) сдвиг фазы меняет знак, а при дальнейшем уменьшении толщины слоя изменение величины фазового сдвига происходит исключительно быстро. Напомним, что по данным Ишигуро¹ при толщине серебряной плёнки 30 Å происходит также изменение знака разности фаз между лучом, проходящим через слой и минуящим его. При некоторых толщинах слоя для некоторых плёнок (золото, состарившееся серебро) интенсивность отражённого света обращается в нуль.

Для сравнения авторы приводят аналогичный график, рассчитанный для гипотетической среды, у которой показатель преломления равен $3 + 2,5 i$. Этот график в некоторой степени (при малых толщинах) имитирует ход кривой, полученной авторами для золота, однако, совпадение кривых далеко не достаточное, чтобы золотому слою можно было приписать такое значение эффективного показателя преломления.

Резюмируя, можно сказать, что измерения авторов реферируемой работы показали, что фазовые соотношения при отражении света от тонких плёнок претерпевают весьма существенные изменения по мере изменения толщины плёнки, причём эти изменения различны для различных веществ. Этого обстоятельства нельзя не учитывать при использовании тонких плёнок в интерференционных светофильтрах и для целей многолучевой интерферометрии.

Кроме того, авторы показали, что при толщине плёнки порядка 400 Å (для серебра и золота), т. е. для практически непрозрачных плёнок, отступлений от предсказаний теории, основанной на представлении об однородном слое, не наблюдается. Но именно при толщинах такого порядка перестаёт наблюдаться гранулированная или пористая структура плёнок. Таким образом, измерения авторов являются убедительным доводом в пользу отсутствия реальных изменений оптических констант вещества при образовании им тонких плёнок.

В. Юрвев

ЦИТИРОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

1. Kôzô Ishiguro, J. Opt. Soc. Am. **40**, 789 (1950).
2. M. Perrot, Rev. d'Optique **28**, 564 (1949); P. Rouard, там же, стр. 569.
3. См., например, G. Hass and N. Scott, J. Opt. Soc. Am. **39**, 179 (1949).
4. См., например, H. Levinstein, J. Appl. Phys. **20**, 306 (1949); G. W. Johnson, J. Appl. Phys. **21**, 449 (1950).
5. F. T. S. Applegard, Proc. Phys. Soc. **49**, 118 (1937).
6. L. G. Schulz and F. J. Scheilner, J. Opt. Soc. Am. **40**, 761 (1950).

АНИЗОТРОПИЯ ЧЕЛОВЕЧЕСКОГО ГЛАЗА И ЕГО РЕЦЕПТОРОВ

Как известно, глаз многих (далеко не всех) людей способен отличать линейно поляризованный свет от неполяризованного.

Если наблюдать белую протяжённую поверхность, излучающую линейно поляризованный свет, то глаз, чувствительный к поляризации света, различает в середине равномерного светового поля слабую лимонно-