

01:07;12

©1994 г.

ОСОБЕННОСТИ ИНТЕРФЕРЕНЦИИ НА ГРАНИЦЕ ТОНКАЯ МЕТАЛЛИЧЕСКАЯ ПЛЕНКА— ДИЭЛЕКТРИЧЕСКОЕ ОСНОВАНИЕ

Д.А.Усанов, А.В.Скрипаль

Проведен анализ влияния толщины металлической пленки на интерференционную картину на границе металлическая пленка—диэлектрическое основание. Установлена немонотонная зависимость сдвига интерференционных полос на границе металлической пленки от ее толщины. Необходимость учета глубины проникновения волны в металлическую пленку продемонстрирована на примере измерения толщины алюминиевых пленок в диапазоне толщины 160–1200 Å.

Проблема исследования характеристик отраженного света от тонких металлических пленок, нанесенных на диэлектрическое основание, освещалась, например, в работах [1–4]. В работах [3,4], в частности, отмечалась специфика в зависимости фазы отраженной волны от толщины пленки для случая, когда металлическое покрытие имеет характер гранул или островков. Знание этой зависимости представляет практический интерес в связи с возможностью определения толщины тонких металлических покрытий методами интерферометрии. Актуальность исследования характера отражения света от таких структур в настоящее время связана с тем, что имеются сообщения [5,6], в которых показана возможность экспериментального определения сдвига интерференционных полос, значительно меньшего четверти длины волны.

В настоящей работе приведены результаты экспериментального и теоретического исследования характера сдвига интерференционных полос при малых толщинах металлической пленки и обсуждается специфика измерений в области малых толщин.

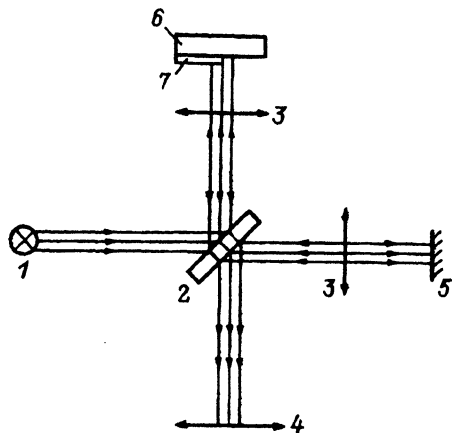
Анализ влияния толщины металлической пленки на интерференции оптического излучения будем исследовать для хода лучей, характерного схеме интерферометра Майкельсона, приведенного на рис. 1. Распределение интенсивности света в выходной плоскости интерферометра, зеркала которого расположены перпендикулярно направлению падения волн, можно представить в виде

$$I = I_1 + I_2 + 2\sqrt{I_1 I_2} F(x),$$

где I_1 и I_2 — интенсивности предметной и опорной волн соответственно, $F(x)$ — интерференционная компонента.

Рис. 1. Схема регистрации интерференционной картины.

- 1 — источник белого света,
- 2 — делительная пластина,
- 3 — объективы,
- 4 — окуляр,
- 5 — эталонное зеркало,
- 6 — диэлектрическая подложка,
- 7 — металлическая пленка.



Для плоской волны нормализованное распределение интенсивности света можно записать в виде

$$F(x) = \cos(\delta + \Delta),$$

где Δ — разность фаз между предметной и опорной волнами (может быть выбрана равной нулю); $\delta(x)$ представляет разность фаз между волной, отраженной от диэлектрической подложки, и волной, отраженной от металлической пленки.

Фазовый сдвиг волны $\delta(x)$, отраженной от двухслойной ограниченной структуры (рис. 2), будет определяться как изменением фазы вследствие конечности глубины проникновения волны в металлическую пленку φ , так и изменением фазы волны при ее прохождении расстояния до диэлектрического основания, равного толщине пленки h . Выберем за начало отсчета $z = 0$ плоскость диэлектрической подложки (рис. 2). Тогда фазовый сдвиг волны δ , отраженной от диэлектрической подложки, запишется в виде

$$\delta = \varphi - \frac{2\pi}{\lambda} 2h, \quad (1)$$

где λ — длина волны света.

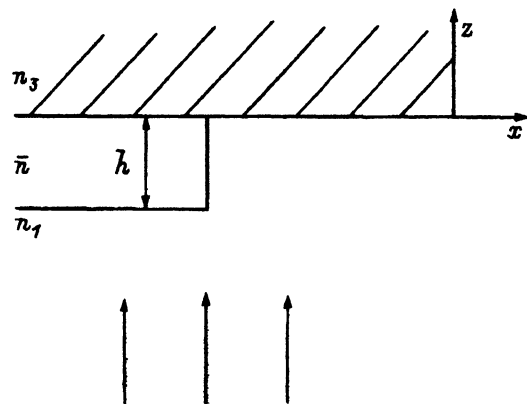


Рис. 2. Исследуемая структура.

n_1, n_2, n_3 — показатели преломления воздуха, металлической пленки, диэлектрического основания; стрелками обозначено направление падения волны.

Фазовый сдвиг φ между отраженной и падающей волнами связан с коэффициентом отражения r от проводящего слоя выражением вида

$$r = \rho \exp(i\varphi),$$

где ρ — модуль коэффициента отражения.

Для поглощающей среды с комплексным показателем преломления $\bar{n} = n + ik$, расположенной между средами с показателями преломления n_1 и n_3 , при нормальном угле падения волн на структуру выражение для коэффициента отражения имеет вид [7]

$$r = \frac{r_{12} + r_{23} \exp(2i\beta)}{1 + r_{12}r_{23} \exp(2i\beta)},$$

где

$$r_{12} = \frac{n_1 - \bar{n}}{n_1 + \bar{n}}, \quad r_{23} = \frac{\bar{n} - n_3}{\bar{n} + n_3}, \quad \beta = 2\pi h \bar{n} / \lambda.$$

Разделяя действительную и мнимую компоненту коэффициентов отражения r_{12} и r_{23}

$$r_{12} = a_1 - ib_1, \quad r_{23} = a_2 + ib_2,$$

находим

$$a_1 = \frac{n_1^2 - n^2 - k^2}{(n_1 + n)^2 + k^2}, \quad b_1 = \frac{2n_1k}{(n_1 + n)^2 + k^2},$$

$$a_2 = \frac{n^2 - n_3^2 + k^2}{(n + n_3)^2 + k^2}, \quad b_2 = \frac{2n_3k}{(n + n_3)^2 + k^2}.$$

Вводя обозначения

$$E_1 = \exp\left(-\frac{4\pi}{\lambda}hk\right), \quad \psi = \frac{4\pi}{\lambda}hn,$$

$$a_3 = a_1 + a_2 E_1 \cos \psi - b_2 E_1 \sin \psi,$$

$$b_3 = a_2 E_1 \sin \psi + b_2 E_1 \cos \psi - b_1,$$

$$a_4 = 1 + E_1 \left[\sin \psi (a_2 b_1 - a_1 b_2) + (a_1 a_2 + b_1 b_2) \cos \psi \right],$$

$$b_4 = E_1 \left[(a_1 a_2 + b_1 b_2) \sin \psi + (a_1 b_2 - a_2 b_1) \cos \psi \right],$$

выражение для величины фазового сдвига волны, отраженной от металлической пленки, заключенной между двумя средами, можно представить в следующем виде:

$$\psi = \arctg \frac{a_4 b_3 - a_3 b_4}{a_3 a_4 + b_3 b_4}. \quad (2)$$

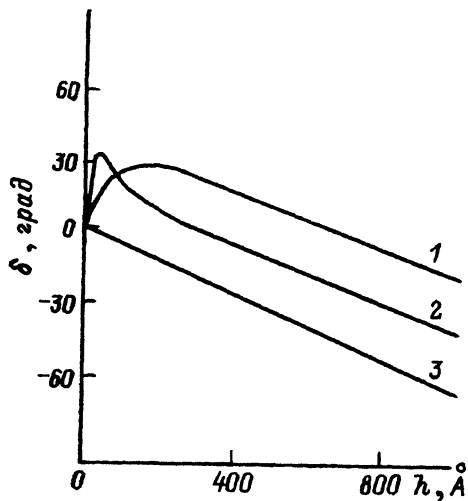


Рис. 3. Зависимость фазового сдвига от толщины металлических пленок.

На рис. 3 приведена зависимость фазового сдвига δ от толщины металлических пленок, рассчитанная для длины волны $0.55 \mu\text{км}$ (1 — для алюминиевой пленки с параметрами $n = 1.3$, $k = 7.48$; 2 — для медной пленки с параметрами $n = 0.304$, $k = 2.79$). Здесь же для сравнения приведена зависимость фазового сдвига от толщины металлических пленок (кривая 3), рассчитанная без учета конечности глубины проникновения волны в пленку ($\delta = -4\pi h/\lambda$).

Немонотонный характер зависимости фазового сдвига от толщины, хорошо наблюдающийся на рис. 3, может быть объяснен следующим образом. На начальном участке кривых 1 и 2 при малых значениях толщины металлической пленки отражение от передней поверхности пленки мало, коэффициент отражения от поверхности пленки намного меньше коэффициента отражения от диэлектрического основания и изменение фазы отраженной волны происходит вследствие прохождения света через оптически более плотную среду (увеличивается оптическая длина пути). Это приводит к положительному набегу фазы отраженной волны. Следует отметить, что за нулевое значение величины фазового сдвига принимается значение, характерное для случая, когда отражение волны происходит от диэлектрической подложки, не покрытой металлической пленкой.

При дальнейшем увеличении толщины металлической пленки преимущественную роль начинает играть отражение от ее передней поверхности, что с учетом выбранного положительного направления изменения знака фазы и перемещения эквивалентной отражающей поверхности в сторону, противоположную направлению падения волны, приводит к отрицательному знаку изменения фазы. Для больших значений толщины металлической пленки, когда глубина проникновения волны в пленку меньше ее толщины, наблюдается линейное изменение фазы отраженной волны с ростом толщины пленки.

Следует отметить, что в связи с зависимостью оптических параметров металлической пленки от толщины начальный участок зависимости $\delta(h)$ может отличаться от расчетного.

Экспериментальные исследования проводились на микроинтерферометре Ливника, в поле зрения окуляра которого наблюдалась граница металлической пленки, совмещенная с системой интерференционных полос белого света. Изгиб интерференционных полос Δx на границе металлической пленки прямо пропорционален величине изменения фазы δ

$$\Delta x = \frac{\delta}{2\pi} p, \quad (3)$$

где p — расстояние между интерференционными полосами.

Для повышения точности измерений изгиба интерференционных полос на границе металлической пленки использовалась измерительная установка, в которой опорное зеркало микроинтерферометра помещалось на пьезокерамическом модуляторе [6]. С помощью блока электронной обработки производилось преобразование интерференционной картины в фотоэлектрический сигнал, опознавание и точное определение положения центра ахроматической полосы в различных сечениях интерференционного поля и измерение изгиба ахроматической полосы на границе пленка-подложка.

При измерении с помощью описанной установки с ростом толщины металлической пленки нами наблюдался немонотонный характер изгиба интерференционных полос на границе металлической пленки. При малых значениях толщины металлической пленки на начальном участке кривой 2 (рис. 3) интерференционные полосы в области диэлектрического основания изгибались в сторону положительного значения сдвига фазы.

С увеличением толщины металлической пленки при переходе через максимум кривых 1 и 2 изгиб интерференционных полос уменьшался вплоть до его полного исчезновения, что соответствовало точкам пересечения кривых 1 и 2 с осью абсцисс. Дальнейший рост металлической пленки приводил к смещению интерференционных полос в сторону, противоположную первоначальному направлению смещения относительно ахроматической полосы в области диэлектрического основания, что соответствовало изменению знака сдвига фазы на противоположное.

Расчет толщины металлической пленки с учетом проникновения волны в пленку проводился по формуле, получаемой из (1),

$$h = \left| \frac{\varphi - \delta}{4\pi} \lambda \right|,$$

Номер образца	δ , град	R	h , Å	h^* , Å	h_p , Å
1	+6	0.84	157	94	195
2	-9.6	0.90	400	142	370
3	-20.4	0.91	557	312	475
4	-38.4	0.91	807	591	750
5	-66	0.91	1216	1000	1260

где φ рассчитывалось с использованием (2), а величина δ определялась по величине изгиба интерференционных полос (3).

Результаты измерений изменения фазы δ , коэффициента отражения R и расчета толщины h алюминиевых пленок приведены в таблице. Для сравнения в этой таблице приведены результаты расчета толщины пленки h^* без учета параметров материала пленки.

Поскольку на результаты измерений тонких металлических пленок может оказывать сильное влияние зависимость оптических постоянных от ее толщины, то для оценки достоверности результатов оптических измерений толщины металлических пленок измерения проводились методом, основанным на интерференции излучения в рентгеновском диапазоне длин волн и аналогичным описанному в работе [2]. Результаты измерения на дифрактометре типа "Дрон-3" толщины металлических пленок h_p также приведены в таблице.

Как следует из результатов, приведенных в таблице, неучет зависимости изгиба интерференционных полос от глубины проникновения волны в металлическую пленку приводит к значительной погрешности в определении толщины металлической пленки.

Список литературы

- [1] Шкляревский И.Н. // ЖТФ. 1956. Т. 26. Вып. 2. С. 333-342.
- [2] Метфессель С. Тонкие пленки, их изготовление и измерение. М., Л.: Госэнергоиздат, 1963. 272 с.
- [3] Розенберг Г.В. // УФН. 1956. Т. 58. № 3. С. 487-518.
- [4] Шкляревский И.Н., Рязанов А.Н. // Опт. и спектр. 1957. Т. 2. Вып. 1. С. 645-650.
- [5] Clarke K.K., Hess D.T. IEEE Trans. Instr. and Meas. 1990. Vol. 39. N 1. P. 52-55.
- [6] Бабенко В.П., Горбаренко В.А., Евминов Н.Н. и др. // Электрон. пром-сть. 1989. № 6. С. 3.
- [7] Борн М., Волф Э. Основы оптики. М.: Наука, 1973. 720 с.

Саратовский университет
им. Н.Г.Чернышевского

Поступило в Редакцию
10 марта 1993 г.