

Н. Д. ГОЛДИНА, М. И. ЗАХАРОВ, Ю. В. ТРОИЦКИЙ
(Новосибирск)

СИНТЕЗ ХАРАКТЕРИСТИК МНОГОЛУЧЕВОГО ОТРАЖАЮЩЕГО ИНТЕРФЕРОМЕТРА

Как было показано ранее [1], существует возможность изготовления двухзеркального отражающего многолучевого интерферометра, который создаст интерференционную картину в виде тонких светлых полос с широкими темными промежутками. Переднее, обращенное к источнику света зеркало этого интерферометра представляет комбинацию поглощающей тонкой (по сравнению с длиной волны) металлической пленки и многослойного диэлектрического покрытия. Такой интерферометр обладает некоторыми интересными особенностями с точки зрения практических применений. Во-первых, интенсивная многолучевая отраженная интерференционная картина наблюдается со стороны источника света, и вследствие этого в отличие от обычного интерферометра Фабри — Перо одно из зеркал может быть совершенно непрозрачным или установлено в труднодоступном месте. Во-вторых, имеется возможность гибко управлять характеристиками, например, независимо от резкости получать идеальный контраст интерференционных полос, по желанию управлять их асимметрией. Возможность получения идеального контраста может быть использована, в частности, в спектроскопии для получения интерферограмм очень слабых линий на фоне значительно более интенсивной мешающей линии. Для этого необходимо так подобрать параметры зеркал интерферометра и его длину, чтобы на длине волны сильной линии интерферометр имел коэффициент отражения, равный нулю. Такая задача возникает, например, при наблюдении слабых спутников в спектре рассеяния Мандельштама — Бриллюэна в слабо прозрачных кристаллах. Сейчас для увеличения контраста в подобных случаях приходится использовать двукратное прохождение света в интерферометре Фабри — Перо [2], что создает значительные экспериментальные трудности. Применение отражающего интерферометра дает возможность значительно упростить такие экспериментальные установки.

Настоящая работа посвящена теоретическому и экспериментальному исследованию возможностей управления характеристиками интерферометра, главным образом, решению задачи получения идеального контраста при полной симметрии интерференционных полос.

1. Постановка задачи. Схема интерферометра показана на рис. 1, а. Здесь n_1 и n_2 — показатели преломления прозрачных диэлектрических сред: среда 1 прилегает к переднему зеркалу со стороны источника света, среда 2 заполняет область между зеркалами. Переднее зеркало состоит из металлической пленки М и обрамляющих ее двух многослойных покрытий I и II из четвертьволновых слоев диэлектриков с показателями преломления n_3 и n_4 ; необходимо, чтобы слева к металлической пленке прилегал слой с большим показателем преломления, а справа — с малым. Считаем, что оптическая длина пути между зеркалами $l_2 \gg \lambda$, а второе зеркало имеет коэффициент отражения, равный единице.

Зависимость энергетического коэффициента отражения интерферометра \bar{R} от набега фазы между зеркалами $\varphi_2 = \frac{2\pi}{\lambda} l_2$ представляет собой периодическую последовательность максимумов \bar{R}_{\max} (при $\varphi_2 = (\varphi_2)_{\max} + n\pi$) и минимумов \bar{R}_{\min} (при $\varphi_2 = (\varphi_2)_{\min} + n\pi$). \bar{R}_{\max} может быть сделано близким к 1 [3, 4]. Существенное отличие от интерферометра

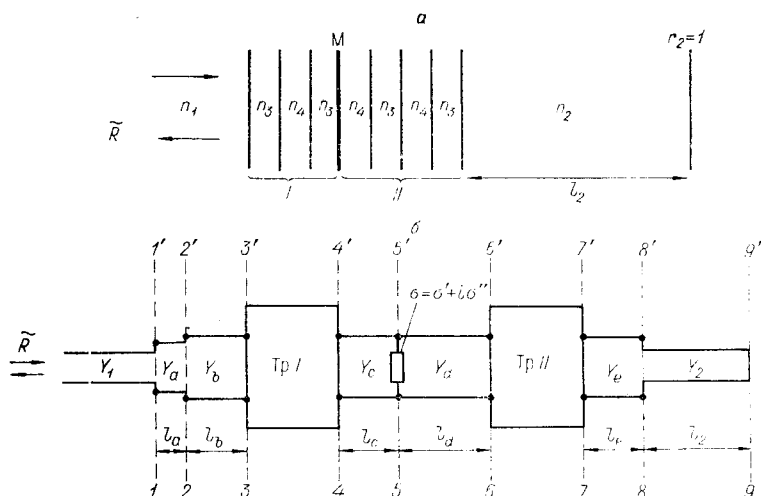


Рис. 1.

Фабри — Перо, работающего на пропускание, заключается в том, что в данном случае имеется не один, а три независимых параметра, которые могут быть использованы для управления характеристиками интерферометра. Например, можно добиться $\bar{R}_{\min} = 0$ независимо от резкости интерференционных полос (в то время как в интерферометре Фабри — Перо эти величины связаны). Кроме того, можно по желанию менять положение минимумов $(\varphi_2)_{\min}$ по отношению к максимумам $(\varphi_2)_{\max}$, т. е. асимметрию интерференционных полос.

Контраст и асимметрия определяются передним зеркалом. Обычная процедура изготовления этого зеркала довольно проста. Когда многослойник I отсутствует, она сводится к вакуумному напылению металлической пленки определенной толщины, которая контролируется по коэффициенту пропускания, и нанесению на нее многослойника из четвертьволновых слоев, толщину которых можно контролировать по экстремумам пропускания контрольного стекла. Коэффициент пропускания T металлической пленки до нанесения покрытий определяется из условия $A'/T = n$, где A' — коэффициент поглощения пленки со стороны подложки при нормальном падении. Для случая когда средой I является кварц ($n = 1,46$), $T = 0,35 - 0,38$. Такой способ изготовления переднего зеркала использовался при выполнении работ [1, 4]. При этом можно получить хороший, близкий к идеальному контраст, т. е. $\bar{R}_{\min} = 0$, но интерференционные полосы могут быть асимметричны по следующим причинам. Во-первых, металлическая пленка может иметь заметную реактивную составляющую проводимости (что соответствует $n \neq \chi$, если считать пленку однородным слоем с комплексным показателем преломления $n - i\chi$). Во-вторых, асимметрия возникает из-за ошибок в толщине диэлектрических пленок.

Ниже решается задача симметризации характеристики $\bar{R}(\varphi_2)$ интерферометра, т. е. получения $(\varphi_2)_{\min} = (\varphi_2)_{\max} + \pi/2$. При этом считается, что одновременно должен быть достигнут идеальный контраст: $\bar{R}_{\min} = 0$. Для определенности примем, что асимметрия характеристики $\bar{R}(\varphi_2)$ связана только с реактивностью пленки, хотя этим методом могут быть скомпенсированы и ошибки в многослойниках. Общий принцип устранения асимметрии заключается в том, что в состав первого зеркала вводятся компенсирующие диэлектрические слои, толщина которых не кратна $\lambda/4$ [1, 3].

1. Расчет условий для согласования и симметризации характеристик интерферометра. В работе [3] был дан расчет отражающего интерфе-

рометра, основанный на аналогии между распространением волн в свободном пространстве и волн тока и напряжения в длинной передающей линии. Задача получения идеального контраста формально может быть сведена к задаче получения режима работы передающей линии на согласованную нагрузку, когда волновая проводимость линии равна входной проводимости нагрузки. Эффективное использование аппарата теории длинных линий для расчета систем с тонкими металлическими пленками стало возможным с введением в оптику тонких пленок модели комплекснопроводящей поверхности [5, 6]. Поверхностная комплексная проводимость связана с традиционными оптическими константами однородного немагнитного поглощающего слоя n , χ и геометрической толщиной слоя d соотношением

$$\sigma = \sigma' + i\sigma'' = [2n\chi\delta + i(n^2 - \chi^2)\delta] Y_0$$

или, если перейти к приведенной поверхностной проводимости $\xi = \sigma/Y_0$,

$$\xi = \xi' + i\xi'' = 2n\chi\delta + i(n^2 - \chi^2)\delta.$$

Здесь $\delta = \frac{2\pi}{\lambda} d$, Y_0 — характеристическая проводимость вакуума, λ — длина волны в вакууме.

Эквивалентная схема отражающего интерферометра, изображенная на рис. 1, б, состоит из отрезков длинных линий, волновые проводимости которых соответствуют характеристическим проводимостям прозрачных сред: $Y_i = n_i Y_0$, где n_i — показатель преломления соответствующей среды. Длины отрезков соответствуют оптическим толщинам слоев. Поглощающая пленка эквивалентна сосредоточенной комплексной проводимости $\sigma = \sigma' + i\sigma''$, включенной в линию параллельно в плоскости 55'. Многослойники из четвертьволновых слоев представлены в виде четырехполюсников TrI и TrII, которые преобразуют проводимость из одной плоскости в другую с коэффициентами трансформации κ_1 и κ_2 соответственно. Если обозначить через Y_3 и Y_4 проводимость диэлектрических сред с высоким и низким показателями преломления, то для TrII, преобразующего проводимость из плоскости 77' в плоскость 66', можно записать $Y_{66'} = \kappa_2 Y_{77'}$. Здесь $\kappa_2 = \left(\frac{Y_4}{Y_3}\right)^{k_2}$, где k_2 — четное число слоев. Для увеличения резкости κ_2 должно быть мало. Коэффициент трансформации многослойника TrI выбирается из условия согласования проводимости поглощающей пленки со средой I и обычно $\kappa_1 > 1$, если рассматривать преобразование на плоскости 33' в плоскость 44': $Y_{44'} = \kappa_1 Y_{33'}$. Для четного числа k_1 слоев $\kappa_1 = \left(\frac{Y_3}{Y_4}\right)^{k_1}$, а для нечетного k_1 в случае, когда компенсирующий отрезок вводится между TrI и поглощающей пленкой, $\kappa_1 = \left(\frac{Y_3}{Y_4}\right)^{k_1-1} \left(\frac{Y_3}{Y_1}\right)^2$. Длинную линию считаем короткозамкнутой, т. е. энергетический коэффициент отражения от второго зеркала принимаем равным единице.

Существуют два различных варианта введения отрезков линий для согласования и симметризации характеристик интерферометра: слева (отрезки длиной l_a , l_b и l_c с волновыми проводимостями Y_a , Y_b и Y_c) и справа (отрезки длиной l_a и l_e с волновыми проводимостями Y_d и Y_e) от поглощающей пленки. Различные обозначения для волновых проводимостей этих отрезков введены для удобства описания; практически компенсирующие отрезки имеют волновые проводимости, равные Y_3 или Y_4 . Первый вариант был рассмотрен в [3], где были выведены условия для получения симметричной картины с идеальным контрастом. Рассмотрим последовательно оба варианта.

А. Компенсирующий слой расположен между металлической пленкой и источником света. Пусть сле-

ва от металлической пленки между плоскостями 44' и 55' введен отрезок линии длиной l_c . Отрезки с волновыми проводимостями Y_a и Y_b пока не рассматриваем. Справа от металлической пленки вводится только трансформатор ТрII, отрезки с Y_d и Y_e отсутствуют. Энергетический коэффициент отражения \tilde{R} для такой системы равен

$$\tilde{R} = \left| \frac{Y_1 - Y_{33'}}{Y_1 + Y_{33'}} \right|^2, \quad (1)$$

где

$$Y_{33'} = \kappa_1 Y_c \frac{Y_{55'} + iY_c \operatorname{tg} \varphi_c}{Y_c + iY_{55'} \operatorname{tg} \varphi_c}, \quad Y_{55'} = \sigma' + i(\sigma'' - \kappa_2 Y_2 \operatorname{ctg} \varphi_2).$$

Здесь $\varphi_c = \frac{2\pi}{\lambda} l_c$ и $\varphi_2 = \frac{2\pi}{\lambda} l_2$ — фазовые толщины отрезков. Для выполнения условия идеального контраста для симметричной картины, необходимо, чтобы $\tilde{R} = 0$ при $\operatorname{ctg} \varphi_2 = 0$. Из (1) после подстановки $Y_{33'}$ и $Y_{55'}$ получаем два равенства:

$$\begin{cases} n_1 n_c - n_1 \xi'' \operatorname{tg} \varphi_c - \kappa_1 n_c \xi' = 0; \\ n_1 \xi' \operatorname{tg} \varphi_c - \kappa_1 n_c (\xi'' + n_c \operatorname{tg} \varphi_c) = 0, \end{cases} \quad (2)$$

в которые входят три неизвестные величины ξ' , ξ'' и $\operatorname{tg} \varphi_c$. Для решения этих уравнений необходимо знать зависимость $\xi'' = f(\xi')$; эта зависимость нестабильна, она определяется не только видом металла, но и технологией изготовления; аналитическое выражение ее дать невозможно. Так как эта зависимость получается в виде экспериментальной кривой, то естественно использовать не численный, а графический метод расчета компенсирующих слоев. Точность, получаемая при этом, вполне достаточна для практического применения.

Есть несколько способов графического решения уравнений (2). Один из них заключается в построении на комплексной плоскости проводимостей окружностей для диэлектрического компенсирующего слоя. Известно, что если фазовая толщина одного из непоглощающих слоев, входящего в состав многослойника, изменяется от 0 до π , то величина проводимости этого многослойника совершает полный обход по окружности на комплексной плоскости Y . На рис. 2 построены окружности

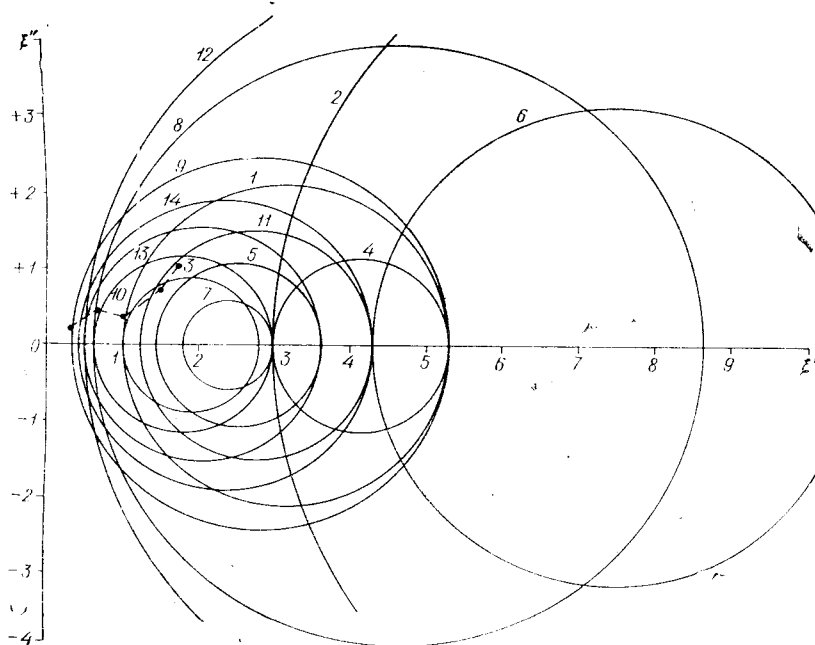


Рис. 2.

Таблица 1

Номер окружности на рис. 2	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
Положение отрезка в линии	Между средой 1 и TrI						Между TrI и поглощающей пленкой							
n_1	1			1,46			1			1,46				
n_c	2,3		1,34		2,3		2,3		1,34		2,3		1,34	
Количество слоев в TrI, k_1	0	2	0	2	0	2	2	4	1	2	2	3	1	2
κ_1	1	2,94	1	2,94	1	2,94	2,94	8,6	5,3	2,94	2,94	7,3	2,48	2,94

для проводимости четырехполюсника, расположенного слева от поглощающей пленки и состоящего из одного компенсирующего слоя и набора четвертьволновых слоев. Проводимость этого четырехполюсника измеряется в плоскости поглощающей пленки, по горизонтальной оси для удобства пользования диаграммой отложены значения ξ' , а по вертикальной — ξ'' . Условие согласования и симметризации ($R=0$ при $\text{ctg } \varphi_2=0$) будет выполнено, если проводимость четырехполюсника в плоскости 55' будет равна величине, комплексно-сопряженной с проводимостью поглощающей пленки $\xi = \xi' + i\xi''$. На рис. 2 дан набор окружностей для различного числа слоев в TrI, двух различных сред 1 (воздух и кварц) и двух различных материалов (ZnS и криолит) (см. табл. 1 к рис. 2). Отсчет числа слоев в TrI производится справа налево, начиная со слоя с высоким показателем преломления. На рис. 2 точками показаны измеренные нами значения ξ для пяти пленок никеля. По номеру окружности, с которой пересекается экспериментальная кривая, обозначенная пунктиром, из таблицы можно определить показатели преломления среды 1 и компенсирующего слоя и число слоев в TrI. Толщина компенсирующего слоя может быть определена из графических построений или по следующим аналитическим формулам, в которые нужно подставить квадрат модуля проводимости пленки в точке пересечения $|\xi|^2 = |\xi'|^2 + |\xi''|^2$:

$$\text{tg}^2 \varphi_c = n_c^2 \frac{(\kappa_1 n_1)^2 - |\xi|^2}{n_1^2 |\xi|^2 - \kappa_1^2 n_c^4} \quad (3)$$

для случая, когда компенсирующий отрезок расположен между средой 1 и трансформатором TrI (окружности 1—6), и

$$\text{tg}^2 \varphi_c = n_c^2 \frac{(\kappa_1 n_1)^2 - |\xi|^2}{(\kappa_1 n_1)^2 |\xi|^2 - n_c^4} \quad (4)$$

для случая, когда компенсирующий отрезок расположен между TrI и поглощающей пленкой (окружности 7—14). При извлечении квадратного корня в формуле (3) нужно брать значения $\text{tg } \varphi_c$ с минусом, если

$\xi'' > 0$, а в формуле (4) $-\operatorname{tg} \varphi_c > 0$, если $\xi'' > 0$. Для двух пленок Ni со значениями $\xi = 0,66 + i0,41$ и $\xi = 1,03 + i0,34$ на окружностях 10 и 1 соответственно из расчета по формулам (4) и (3) следует, что для первой из них компенсирующий слой из криолита с $\varphi_c = 70^\circ$ нужно вводить между TrI, состоящим из двух четвертьволновых слоев криолита и ZnS, и поглощающей пленкой (средой 1 здесь является воздух), а для второй пленки достаточно напылить только компенсирующий слой ZnS с $\varphi_c = 169,5^\circ$ без трансформатора (первая среда 1 тоже воздух).

В описанном выше графическом способе решения уравнений (2) варьируемым параметром является проводимость поглощающей пленки ξ . Зная зависимость $\xi'' = f(\xi')$, можно использовать одну из окружностей, приведенных на рис. 2, напыляя металлическую пленку с соответствующими параметрами. Для определения толщины одного компенсирующего слоя при известной зависимости $\xi'' = f(\xi')$ можно также использовать диаграмму Смита, применимую в радиотехнике для расчета длинных линий. Для этого на диаграмме нужно построить окружности для различных Y_1 , k_1 и n_c , как было сделано на рис. 2, и затем нанести на диаграмму зависимость $\xi'' = f(\xi')$, где ξ'' и ξ' должны быть приведены к n_c (для двух n_c , равных 1,34 и 2,3, получатся две кривые $\frac{\xi''}{n_c} = f\left(\frac{\xi'}{n_c}\right)$). Точки пересечения кривых с соответствующими окружностями определяют толщину компенсирующего слоя.

Более общий графический способ решения равенств (2), допускающий произвольное число компенсирующих слоев с варьируемой (т. е. не равной $\lambda/4$) толщиной, требует построения круговых диаграмм для проводимостей Y или для комплексных амплитудных коэффициентов отражения r на границе с первой средой отдельно для каждого из применяемых диэлектрических материалов. Диаграммы для r удобнее использовать, так как при напылении обычно контролируется величина $|r|^2$. Применение круговых диаграмм для расчета тонких пленок описано в обзорных статьях [7] и [8]. Там же даны методы построения диаграмм, поэтому здесь они не рассматриваются. В нашем случае фигурируют всего два диэлектрика с различными показателями преломления (ZnS и криолит) и удобно использовать две наложенные друг на друга сетки окружностей, построенные для различных диэлектриков [8]. Такая диаграмма изображена на рис. 3. По сетке окружностей, расположенной ближе к центру диаграммы, можно определить комплексный амплитудный коэффициент отражения (на границе со средой с показателем преломления $n=1$) от пленки криолита ($n=1,34$) любой толщины, нанесенной на произвольную подложку. Подложкой в этом случае может быть любая оптическая структура, в том числе и комбинация поглощающей пленки с многослойником. Вышесказанное относится и к сетке окружностей, построенной для ZnS ($n=2, 3$). Замкнутые окружности соответствуют условию постоянства амплитуд $r = \operatorname{const}$, а дуги, исходящие из одной точки, — постоянной фазе $\varphi = \operatorname{const}$ (по ним отсчитывается толщина слоя). Диаграмма с наложенными сетками окружностей необходима при решении данной задачи, в которой требуется определять толщины нескольких компенсирующих слоев для заданной начальной структуры. Эта задача аналогична задаче, решаемой при конструировании просветляющих покрытий [8]. В качестве примера использования диаграммы для решения системы уравнений (2) на диаграмме рис. 3 показана траектория движения из исходной точки $r_{55'} = -0,35 - i0,24$ (пленка никеля с $r_{55'} = 1,71 + i1$) в конечную точку $r_{55'} = 0$, которая получается из требования, чтобы $\bar{R} = 0$ при $\operatorname{ctg} \varphi_2 = 0$. Начальная амплитуда коэффициента отражения определяется по формуле

$$r_{55'} = \frac{Y_1 - Y_{55'}}{Y_1 + Y_{55'}}$$

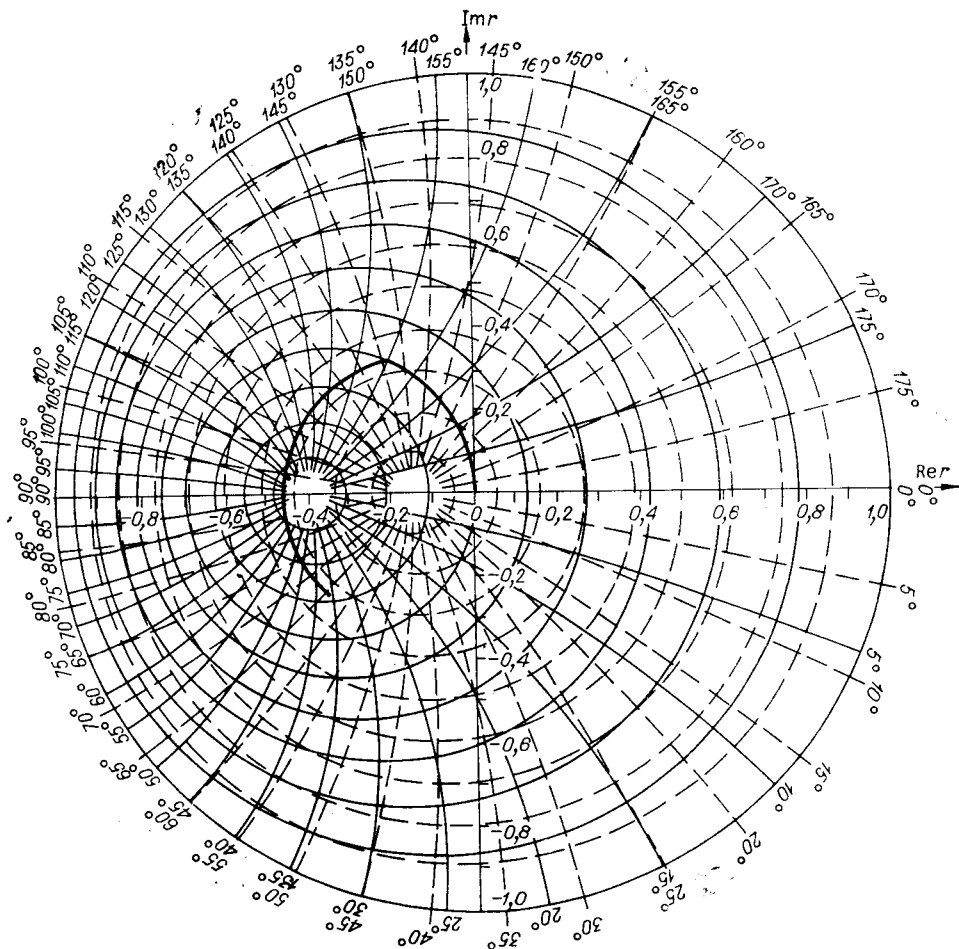


Рис. 3.

где $Y_{55}' = \sigma' + i\sigma''$ — проводимость в плоскости 55' при условии, что $\text{ctg } \varphi_2 = 0$ [см. формулу (1)]. Начальная точка r_{55}' определяется в той же среде ($n=1$), что и конечная величина r_{55}' . Из диаграммы видно, что согласование и симметризация для этого случая могут быть проведены с помощью двух слоев (криолита и ZnS) с толщинами $\varphi_b = 68^\circ$ и $\varphi_a = 25^\circ$ соответственно, причем первым на пленку никеля наносится слой криолита.

Круговые диаграммы для r полезны еще в том отношении, что по ним можно определить знак мнимой части проводимости металлической пленки. Если $\sigma'' < 0$, то первоначальная точка r_{55}' окажется во втором квадранте диаграммы и при напылении диэлектрического слоя коэффициент отражения будет вначале уменьшаться, следуя по кругу до реальной оси, а затем начнет увеличиваться. Если $\sigma'' > 0$, то r_{55}' располагается в III квадранте и при напылении диэлектрического слоя r увеличивается до значения r_{max} , соответствующего пересечению круга с реальной осью.

Б. Компенсирующий слой расположен между металлической пленкой и средой 2. Второй вариант согласования и симметризации характеристик интерферометра возникает, если компенсирующий слой вводится внутрь интерферометра. В этом случае слева от поглощающей пленки находится только среда 1 и условие согласования выполняется, если $\sigma' = Y_1$. Слои, расположенные справа,

вливают только на симметрию интерференционной картины. Можно написать следующее выражение для коэффициента отражения:

$$\tilde{R} = \left| \frac{Y_1 - Y_{55'}}{Y_1 + Y_{55'}} \right|^2 \quad (5)$$

где

$$Y_{55'} = \sigma' + i\sigma'' + Y_d \frac{Y_{66'} + iY_d \operatorname{tg} \varphi_d}{Y_d + iY_{66'} \operatorname{tg} \varphi_d}, \quad Y_{66'} = -i\kappa_2 Y_2 \operatorname{ctg} \varphi_2$$

(все обозначения взяты из рис. 1, б). Отрезок с Y_e пока не рассматриваем. После подстановки $Y_{66'}$ и $Y_{55'}$ в \tilde{R} получаем

$$\tilde{R} = \frac{(Y_1 - \sigma')^2 + \left[\sigma'' + Y_d \frac{-\kappa_2 Y_2 \operatorname{ctg} \varphi_2 + Y_d \operatorname{tg} \varphi_d}{Y_d + \kappa_2 Y_2 \operatorname{ctg} \varphi_2 \operatorname{tg} \varphi_d} \right]^2}{(Y_1 + \sigma')^2 + \left[\sigma'' + Y_d \frac{-\kappa_2 Y_2 \operatorname{ctg} \varphi_2 + Y_d \operatorname{tg} \varphi_d}{Y_d + \kappa_2 Y_2 \operatorname{ctg} \varphi_2 \operatorname{tg} \varphi_d} \right]^2} \quad (6)$$

Отсюда можно найти положения максимума и минимума \tilde{R} , выраженные через углы φ_2 , в зависимости от фазовой толщины отрезка φ_d :

$$(\varphi_2)_{\max} = \operatorname{arctg} \left(-\frac{\kappa_2 Y_2 \operatorname{tg} \varphi_d}{Y_d} \right),$$

$$(\varphi_2)_{\min} = \operatorname{arctg} \frac{\kappa_2 Y_2 (Y_d - \sigma'' \operatorname{tg} \varphi_d)}{Y_d (\sigma'' + Y_d \operatorname{tg} \varphi_d)}. \quad (7)$$

Для симметрии \tilde{R} необходимо, чтобы разность $[(\varphi_2)_{\max} - (\varphi_2)_{\min}]$ была равна $\pi/2$, откуда получается следующее условие для толщины компенсирующего отрезка:

$$\varphi_d = \operatorname{arctg} \left\{ n_d \frac{-\left[\left(\frac{n_d}{\kappa_2 n_2} \right) - 1 \right] \pm \sqrt{\left[\left(\frac{n_d}{\kappa_2 n_2} \right)^2 - 1 \right]^2 - \left(\frac{2\xi''}{n_2} \right)^2}}{2\xi''} \right\}. \quad (8)$$

Аналогично выводится выражение для толщины отрезка φ_e (отрезок с Y_d при этом отсутствует):

$$\varphi_e = \operatorname{arctg} \left\{ n_e \frac{-\kappa_2 \left[\left(\frac{n_e}{n_2} \right)^2 - 1 \right] \pm \sqrt{\left[\left(\frac{n_e}{n_2} \right)^2 - 1 \right]^2 - \left(\frac{2\xi''}{n_2} \right)^2}}{2\xi''} \right\}. \quad (9)$$

Из этих формул можно найти верхний предел ξ'' для поглощающих пленок, асимметрия которых может быть скомпенсирована введением отрезков с n_d и n_e . Результаты оценок представлены в табл. 2 для двух различных материалов компенсирующих отрезков (ZnS и криолита), для двух положений отрезков в линии и различного количества слоев в ТрII. Например, если компенсирующий отрезок с $n_d=1,34$ вводится между поглощающей пленкой и ТрII, максимальное значение $|\xi''|$, которое может быть скомпенсировано при

Таблица 2

Верхний предел $|\xi''|$ для различных материалов компенсирующих слоев и $\kappa_2 Y_2$

Количество слоев в ТрII	0	2	4	6	8
$\kappa_2 Y_2$	1	0,34	0,116	0,04	0,013
$n_d=2,3$	2,15	7,6	23		
$n_d=1,34$	0,4	2,5	7,6	23	
$n_e=2,3$	2,15	0,73	0,25	0,09	0,03
$n_e=1,34$	0,4	0,14	0,05	0,02	0,005

$x_2Y_2=0,34$ (ТрII состоит из двух слоев), равно 2,5. Из таблицы видно, что чем больше слоев в ТрII, тем более высокие значения ξ'' могут быть скомпенсированы. Практически уже для 4-слойного покрытия ($x_2Y_2=0,116$) с одним компенсирующим слоем криолита или ZnS возможно получить симметричную картину для любой металлической пленки, если отрезок вставить между поглощающей пленкой и ТрII. И наоборот, для отрезка между ТрII и средой 2 возможности симметризации уменьшаются с увеличением числа слоев в ТрII.

3. Экспериментальная проверка возможностей согласования и симметризации. Для проведения эксперимента была собрана установка по схеме [9]. Источником излучения служил He—Ne-лазер ЛГ-55, генерировавший на 1—3 продольных модах; поперечные моды устранялись разъюстировкой выходного зеркала лазера. На отражающий интерферометр падала плоская волна, полученная с помощью промежуточной линзы. Расстояние между зеркалами можно было грубо менять в пределах 3—10 мм и сканировать в диапазоне нескольких длин волн вдоль оси пьезокерамикой, на которой было укреплено переднее зеркало интерферометра. Свет, отраженный от интерферометра, с помощью делительной пластинки направлялся на фотоумножитель, выход которого был подсоединен к осциллографу с синхронной разверткой по оси X. На экране осциллографа получалась зависимость R от φ_2 . Делительная пластинка имела коэффициент пропускания меньше 1% и выполняла одновременно роль развязки лазера от отражающего интерферометра.

Интерферометр состоял из двух зеркал: заднее зеркало имело коэффициент отражения, близкий к единице; переднее зеркало состояло из различных комбинаций металлической пленки и диэлектрических слоев. Все покрытия изготовлялись термическим испарением в вакууме $5 \cdot 10^{-6}$ мм рт. ст. В установке имелось три испарителя (для металла и двух диэлектриков — криолита и ZnS), каждый из которых во время напыления устанавливался прямо под напыляемой подложкой. Этим достигалась однородность и исключалась анизотропия покрытий, которая возникает при косом напылении. В процессе напыления контролировались одновременно коэффициент пропускания и коэффициент отражения покрытия со стороны воздуха или со стороны подложки (угол падения света $\sim 1,5^\circ$). Это давало возможность определять активную часть проводимости металлической пленки, не вынося ее на воздух. Источником света для контроля напыления служил также He—Ne-лазер, выходная мощность которого контролировалась.

Энергетические характеристики изготовленных покрытий измерялись в бегущей волне для $\lambda=6328 \text{ \AA}$: коэффициент пропускания при нормальном падении и коэффициенты отражения R и R' со стороны воздуха и со стороны подложки (угол падения $\sim 1,5^\circ$). Из измеренных характеристик находилось значение ξ' и абсолютное значение ξ'' . Знак ξ'' определялся по измерениям в стоячей волне, когда в качестве переднего зеркала использовалась чистая металлическая пленка [9].

Первая часть работы заключалась в экспериментальном получении максимального контраста. Для этого необходимо как можно точнее согласовать переднее зеркало с исходной средой 1. В наиболее простом варианте, когда справа (см. рис. 1, б) от поглощающей пленки расположен ТрII, а слева — только среда 1, условие согласования будет выполнено, если приведенная проводимость металлической пленки ξ' будет равна n_1 . Для случая когда средой 1 является кварцевая подложка, $\xi'=A'/T$ должно быть равно 1,46. Представляло интерес проверить, насколько близко можно приблизиться к этому значению. Было исследовано изменение ξ' при вынесении пленки на воздух и при нанесении на нее диэлектрического слоя. Выяснилось, что пленки Ni стабильны во времени и параметры Ni-пленок несущественно изменяются при нанесении слоя диэлектрика, в то время как для пленок Ag

этим изменениями нельзя пренебречь. Хотя Ni является лучшим материалом для изготовления переднего зеркала интерферометра, все же в зависимости от условий напыления соотношение между ξ' и ξ'' меняется неконтролируемым образом. Например, останавливая напыление при $T=0,36$, можно получить следующие значения параметров пленки: $\xi''=+(0,7-1,15)$, $\xi'=1,40-1,53$. \bar{R}_{\min} в стоячей волне для пленок с такими значениями ξ' будет равно $0,04-0,05\%$, и согласование будет вполне хорошим. Нами была получена пленка Ni с $\xi=1,49+i0,7$ ($T=0,363$), на которую затем был нанесен 4-слойник из криолита и ZnS. Измеренное значение \bar{R}_{\min} равно $0,017\%$ (по расчету $0,01\%$) при $\bar{R}_{\max}=72\%$. Значение контраста $\frac{\bar{R}_{\max}}{\bar{R}_{\min}}$, полученное из этих измерений,

равно 4200. Контраст интерферометра Фабри — Перо с зеркалами, коэффициент отражения которых равен среднему геометрическому значению от коэффициентов отражения зеркал, использованных в отражающем интерферометре, на порядок ниже.

Во второй части были экспериментально проверены оба варианта симметризации, описанные выше. Первый вариант был выполнен с пленкой Ni, на которую со стороны среды 1 (воздух) добавлялся слой ZnS, толщина которого подбиралась из условия согласования и симметризации на основе измеренных характеристик чистой пленки никеля. Справа от пленки, если смотреть по схеме 1, б, располагался трансформатор TrII, состоящий из 4 слоев криолита и ZnS, с коэффициентом трансформации $\kappa_2=0,116$. Средой 2 в этом случае была кварцевая подложка, обратная сторона которой была просветлена и отражала не более $0,03\%$. Кварцевая подложка диаметром 20 мм была разделена на секторы, каждое покрытие напылялось на чистый участок кварца, так что можно было измерить отдельно чистую пленку Ni, комбинацию Ni+4-слойник, комбинацию дополнительный слой +Ni+4-слойник и, наконец, параметры дополнительного слоя ZnS. Контроль R' и T производился по одному из участков подложки. Вначале на подложку был нанесен 4-слойник и сразу же, не вынимая ее из вакуума, после поворота подложки — слой Ni с $\xi=1,44+i1,1$. На осциллограммах а и б (рис. 4) показана зависимость $\bar{R}(\varphi_2)$, когда в качестве переднего зеркала используется пленка Ni без покрытий и пленка Ni с TrII. Видно, что асимметрия, вызываемая реактивностью металлической пленки, увеличивается с ростом числа слоев в TrII: положение минимума \bar{R} приближается к положению максимума \bar{R} . Как следует из рис. 2, симметризация для пленки Ni с $\xi=1,44+i1,1$ может быть сделана слоем ZnS с фазовой толщиной 145° [точка лежит на круге 1 (см. рис. 2)]. Слой такой толщины был напылен на подложку, и для участка, где была Ni-пленка без покрытий, действительно получилась симметричная картина. Но для участка, где Ni-пленка была нанесена на 4-слойник, картина по-прежнему осталась асимметричной, хотя асимметрия уменьшилась. Это объясняется неточным нанесением слоев $\lambda/4$ многослойника. В бегущей волне измеренный коэффициент отражения от комбинации Ni с 4-слойником также отличается от расчетного значения. По диаграмме рис. 3 можно ввести поправку на это, определив смещение начальной точки r из-за неточности при напылении 4-слойника. Для бегущей волны это смещение можно определить точно, зная начальное значение $|r|$ в бегущей волне и засекая максимум r при напылении слоя ZnS (начальная точка лежит на круге, обеспечивающем такой максимум r). Для стоячей волны смещение начальной точки тем меньше отличается от смещения начальной точки в бегущей волне, чем больше число слоев в TrII. Так, уже для 4-слойника они примерно равны. На осциллограмме в симметрия получена после введения поправки на толщину компенсирующего слоя, вычисленную описан-

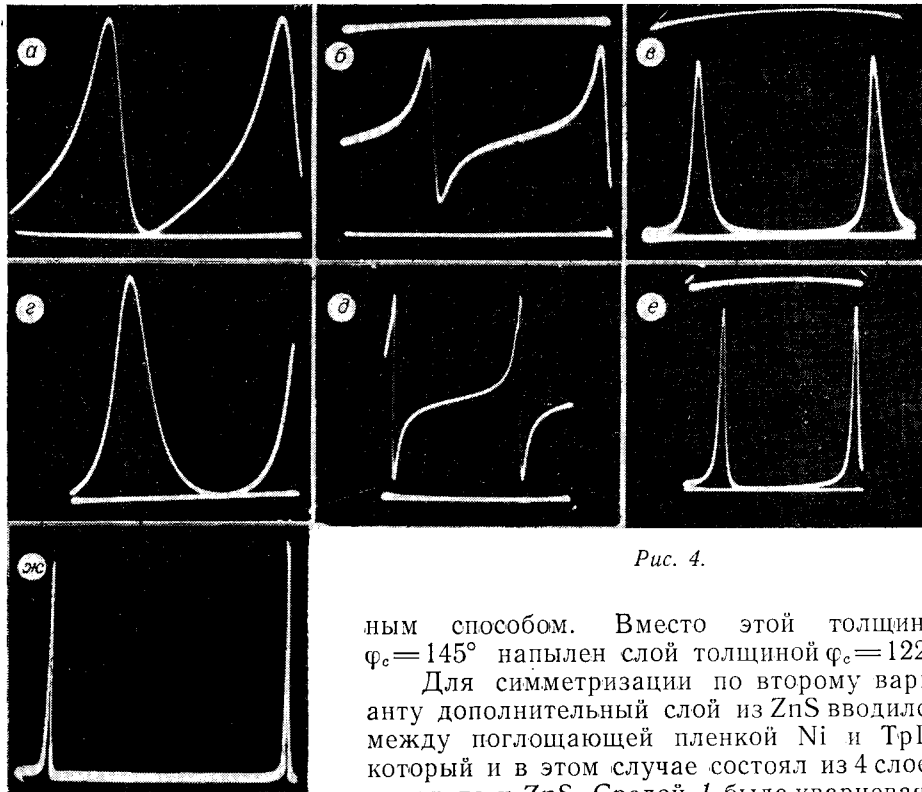


Рис. 4.

ным способом. Вместо этой толщины $\varphi_c = 145^\circ$ напылен слой толщиной $\varphi_c = 122^\circ$.

Для симметризации по второму варианту дополнительный слой из ZnS вводился между поглощающей пленкой Ni и TrII, который и в этом случае состоял из 4 слоев криолита и ZnS. Средой 1 была кварцевая подложка, на которую поочередно наносились пленка Ni, компенсирующий слой ZnS и затем многослойник; средой 2 был воздух. Как и в предыдущем случае, по отдельным секторам подложки можно было измерить характеристики различных комбинаций: чистого Ni, Ni с дополнительным слоем ZnS, Ni с 4-слойником и результирующую комбинацию Ni с слоем ZnS и 4-слойником. Параметры поглощающей пленки ξ' и ξ'' после напыления измерялись в бегущей и стоячей волне и затем для нее рассчитывалась толщина дополнительного слоя по формуле (8). Для выполнения условия согласования активная часть проводимости металлической пленки должна быть равной 1,46. Экспериментально была изготовлена пленка Ni с $\xi = 1,54 + i1$, характеристика \bar{R} для нее та же, что и на осциллограмме a. После напыления слоя ZnS с фазовой толщиной $\varphi_a = 151^\circ$, удовлетворяющей условию симметризации для чистой пленки Ni, картина действительно получилась симметричной, как видно из осциллограммы г. Толщина слоя контролировалась по коэффициенту отражения от чистого участка кварцевой подложки. Затем на эту же подложку был напылен 4-слойник. При точных четвертьволновых слоях минимум \bar{R} должен был получиться при $\varphi_2 = 150^\circ$ (угол φ_2 отсчитывается от $(\varphi_2)_{\max}$ и возрастает слева направо). Экспериментальное значение минимума \bar{R} получилось при $\varphi_2 = 45^\circ$ (осциллограмма д). О неточном нанесении 4-слойника говорит и тот факт, что R' в бегущей волне комбинации Ni+4-слойник равен 21,5% вместо 9,7% по расчету, а асимметрия \bar{R} для этой комбинации (осциллограмма e) также отличается от расчетной. Для получения симметричной картины от зеркала, в состав которого входит Ni-пленка с $\xi = 1,54 + i1$ с 4-слойником, необходима по расчету толщина слоя ZnS $\varphi_a = 156^\circ$. Небольшое отступление от этой толщины и неточность при нанесении многослойника ведут к заметной асимметрии, как было показано выше. Контролируя при напылении коэффициент отражения со

стороны подложки, можно добиться большой точности при нанесении компенсирующего слоя, так как его толщина ненамного отличается от толщины, при которой находится минимум R' . Толщину слоев многослойника можно также контролировать по экстремумам R' .

Для иллюстрации относительной ширины максимумов, полученной в отражающем интерферометре, на осциллограмме \mathcal{K} показана зависимость $\tilde{R}(\varphi_2)$ для переднего зеркала, состоящего из Ni-пленки и 6-слойника. Отношение полной ширины максимумов на уровне $\tilde{R}=0,5\tilde{R}_{\max}$ к расстоянию между максимумами равно $1/70$.

4. **Заключение.** Описан метод синтеза характеристик отражающего интерферометра, и приведены экспериментальные данные, подтверждающие правильность расчета. Основной целью работы было получение симметричной зависимости коэффициента отражения интерферометра при сканировании расстояния между зеркалами и одновременно достижение идеального контраста, т. е. $\tilde{R}_{\min}=0$. Экспериментально получен контраст $\frac{\tilde{R}_{\max}}{\tilde{R}_{\min}} = 4200$, что на порядок выше контраста интерферометра Фабри — Перо с соответствующими зеркалами.

Расчет многослойной системы с заданными свойствами является сложной задачей, особенно когда система состоит из слоев с произвольной толщиной, в том числе и из поглощающих. Метод расчета, использованный в данной работе, основан на теории длинных линий, причем все вычисления значительно упрощены благодаря применению модели комплексно-проводящей поверхности для описания свойств тонких металлических пленок в оптической области. Для выполнения условий согласования и симметризации в случае, когда компенсирующие слои добавляются со стороны исходной среды, применены графические методы. Эти методы применимы не только к решению данной конкретной задачи, но могут быть использованы в расчетах металл-диэлектрических структур, работающих на отражение, и в первую очередь для расчета узкополосных отражательных светофильтров [10].

ЛИТЕРАТУРА

1. Ю. В. Троицкий. Отражающий интерферометр на основе согласованной металлической пленки.— «Письма в ЖЭТФ», 1970, т. 11, с. 281.
2. J. R. S u n d e r s o c k. Brillouin Scattering Study of SbSi Using a Double-Passed, Stabilised Scanning Interferometer.— «Opt. Commun.», 1970, v. 2, № 2.
3. Ю. В. Троицкий. Расчет многолучевого отражающего интерферометра с согласованным передним зеркалом.— «Опт. и спектр.», 1971, т. 30, с. 544.
4. Н. Д. Голдина, Ю. В. Троицкий. Экспериментальное исследование многолучевого отражающего интерферометра с согласованным передним зеркалом.— «Опт. и спектр.», 1971, т. 31, с. 146.
5. Ю. В. Троицкий. Об использовании модели комплексно-проводящей поверхности для описания оптических свойств гранулированных металлических пленок.— В кн.: Диспергированные металлические пленки. Киев, ИФ АН УССР, 1972.
6. Ю. В. Троицкий. Модель проводящей поверхности при изучении оптических свойств тонких металлических пленок.— «Автоматрия», 1972, № 6.
7. П. Х. Бернинг. Теория и методы расчета оптических свойств тонких пленок.— В кн.: Физика тонких пленок. Т. I. М., «Мир», 1967.
8. J. H. A p f e l. Graphics in Optical Coating Design.— «Appl. Opt.», 1972, v. 11, № 6.
9. Ю. В. Троицкий, М. И. Захаров. Об уменьшении отражения в оптической области при помощи согласованных поглощающих пленок.— «Радиотехника и электроника», 1970, т. 15, с. 1992.
10. П. Г. Кард. Теория узкополосного отражательного интерференционного светофильтра.— «Опт. и спектр.», 1965, т. 18, с. 684.

Поступила в редакцию 12 октября 1973 г.