

УДК 535.41:535.854

М. А. Хащан
(Египет)

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ РЕЗОНАНСНОГО КОНТУРА ТРЕХСЛОЙНОГО ИНТЕРФЕРОМЕТРА

Экспериментально исследовано изменение глубины модуляции интерферограммы трехслойного интерферометра в зависимости от относительного смещения максимумов пропускания составляющих слоев. Смещение полос производилось путем вращения интерферометра со слегка клиновидными слоями. Интерферограмма записана фотоэлектрически при сканировании полос равного наклона. Экспериментальное соотношение между контрастностью полос модуляции и относительным смещением привело к установлению аналитической формулы для аппаратной функции интерферометра.

Введение. В работе [1] рассмотрены некоторые свойства трехслойного интерферометра в связи с его применением как резонатора, спектрометра, рефрактометра и компаратора. В этом случае интерферограмма полос равного хроматического порядка при работе со сплошным спектром определяет резонансные частоты интерферометра. Интерферограмма полос равного наклона при освещении монохроматическим светом определяет аппаратную функцию (резонансный контур) трехслойного интерферометра. Экспериментальное определение этой функции имеет большое значение при расчете параметров резонатора, спектрометра, светофильтра и т. д., действия которых основаны на использовании трехслойного или многослойного интерферометра.

В настоящей работе впервые экспериментально записан резонансный контур трехслойного интерферометра при разных условиях настройки двух его слоев. Вращение трехслойного интерферометра, имеющего слегка клиновидные толстые слои, привело к сканированию интерферограммы в монохроматическом свете при изменении относительного смещения полос пропускания составляющих слоев. Получены интерферограммы с переменной глубиной модуляции. Зависимость глубины модуляции от относительного смещения интерференционных полос привела к выводу формулы резонансного контура интерферометра.

Трехслойный интерферометр. Трехслойный интерферометр состоит из четырех плоскопараллельных зеркал M_1 , M_2 , M_3 и M_4 (рис. 1), которые отделяются друг от друга средами с разными показателями преломления. Этот интерферометр, например, осуществляется обычным интерферометром Фабри — Перо с плоскопараллельными подложками зеркал. В нашем случае распорное кольцо длиной 70 мм фиксирует толщину воздушного слоя. Подложки зеркал имеют каждая геометрическую толщину 17,75 мм. Они представляют собой первый и третий слои интерферометра. Одна поверхность каждой подложки обладает коэффициентом отражения порядка 0,95. Другая поверхность подложки не покрыта и имеет низкий коэффициент отражения, примерно 0,04, за счет френелевского отражения от границы раздела воздуха и стекла.

В более простом виде интерферометра (рис. 1, а) покрытия поверх-

ности подложек обращены друг к другу так, что средний воздушный слой обладает высокой добротностью. Передний и задний стеклянные слои интерферометра имеют низкие добротности. В этом случае полосы пропускания среднего слоя во много раз уже полос наружных слоев, и интерферограмма состоит из трех видов полос. Каждый вид полос принадлежит только одному слою. На рис. 1, б непокрытая поверхность одной подложки обращена к покрытой поверхности другой подложки.

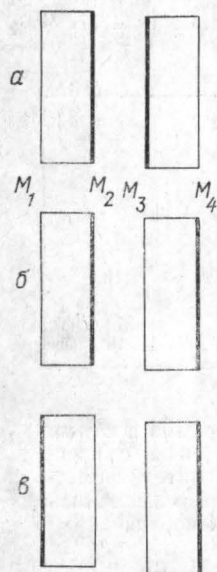


Рис. 1. Варианты трехслойного интерферометра. Прямоугольники представляют пластины, а жирные линии — покрытые поверхности

В этом случае кроме полос пропускания каждого отдельного слоя получаются интерференционные полосы, соответствующие разности хода, равной сумме разностей хода в двух смежных слоях с низкими добротностями. На рис. 1, в непокрытые поверхности подложек обращены друг к другу, а покрытые поверхности становятся

концевыми зеркалами. В этом случае получается наиболее сложная интерферограмма, по которой можно распознавать полосы пропускания каждого отдельного слоя вместе с полосами при разностях хода, равных сумме разностей хода в двух или трех смежных слоях. Для точной идентификации различных полос используются отношения свободных областей дисперсии для известных толщин [2]. В дальнейшем анализ экспериментальных результатов будет проведен только в случае интерферометра со средним слоем высокой добротности (рис. 1, а).

Рассмотренный в настоящей работе трехслойный интерферометр позволяет контролировать сдвиг полос пропускания его слоев относительно друг друга. Стеклянные пластины интерферометра слегка клиновидны, что дает возможность производить относительное смещение полос пропускания

этих пластин с помощью вращения интерферометра в плоскости, совпадающей с главными сечениями клиньев. Благодаря этому обстоятельству можно записать резонансный контур интерферометра как в случае совпадения (настройки), так и в случае расхождения (расстройки) полос пропускания составляющих слоев.

Относительное смещение контуров пропускания можно вычислить через измеряемые по интерферограмме величины. Для этой цели очень важно, чтобы клиновидная пластина имела переменную оптическую толщину l (рис. 2), которая подчиняется линейной зависимости $l = n(h_0 + \alpha y)$, где h_0 — геометрическая толщина вдоль оси, перпендикулярной y , α — угол клина и n — показатель преломления пластины. Соотношение между ординатой y и радиусом вращения r дается уравнением $y = r \operatorname{tg} \theta_0$, где θ_0 — угол наблюдения. Таким образом, разность хода в случае полос равного наклона $2l \cos \theta = 2n(h_0 \pm ar |\operatorname{tg} \theta_0|) \cos \theta$, где θ — угол преломления внутри пластины.

Следовательно, разность хода внутри клиновидных слоев имеет не одинаковые значения для абсолютных значений угла наблюдения. Это

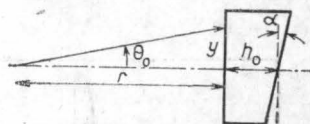


Рис. 2. Определение связи между углом вращения и разностью хода в клиновидной пластине

значит, что клиновидность пластины приводит к смещению ее полос относительно полос, наблюдаемых в случае ее плоскопараллельности. Относительное смещение полос наружных слоев целесообразно выражать через дробь порядка δp :

$$\delta p = \frac{2n^2}{\lambda} (\alpha_3 r_3 - \alpha_1 r_1) \sqrt{\frac{2q}{p_0} - \left(\frac{2q}{p_0}\right)^2}, \quad (1)$$

где λ — длина волны, p_0 — аксиальный интерференционный порядок среднего слоя и q — номер угловой полосы среднего слоя на интерферограмме, отсчитанный от центра (q считается равным нулю). Фор-

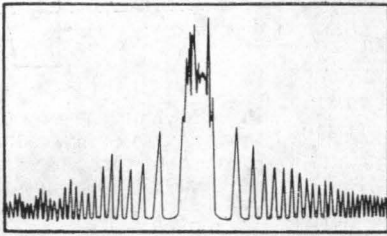


Рис. 3. Интерферограмма в случае совпадения главного сечения клина с плоскостью вращения интерферометра. Некоторые моды лазера разрешены в центре

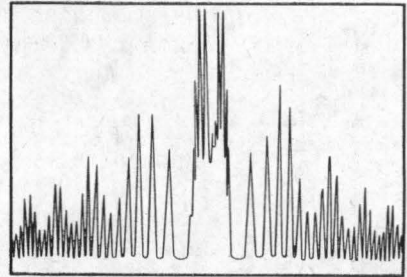


Рис. 4. Интерферограмма в случае совпадения ребра клина с плоскостью вращения интерферометра. Моды лазера разрешены лишь в центральном порядке

мула (1) будет применена ниже при подстановках: радиусы вращения первого и третьего слоев $r_1=2$ см и $r_3=10,77$ см и углы клиньев $\alpha_1=\lambda/10$ и $\alpha_3=\lambda/4,5$, где $\lambda=6328$ Å.

Интерферограмма. Полосы равного наклона с клиновидными слоями становятся доступными наблюдению, если половина угла первого дифракционного минимума у выходной апертуры больше угла клина [3]. В данной работе падающий параллельный пучок имел сечение с диаметром, равным 50 мм, в то время, когда входная и выходная апертуры в виде квадратных отверстий обладали сторонами, равными 10 мм. Сечение пучка, даваемого лазером на смеси газов гелия и неона, увеличивалось с помощью обращенной телескопической системы. Многомодовое излучение генерировалось в конфокальном резонаторе с длиной 116,5 см. Моды покрывали спектральный интервал с шириной 0,01 Å. Частоты мод испытывали хаотическую флуктуацию, что приводило к уменьшению степени монохроматичности. В этом случае лазерный пучок рассматривался в виде спектральной линии с шириной, равной спектральному интервалу всех генерируемых мод.

Полосы равного наклона были записаны фотозеллектрическим способом при вращении интерферометра в плоскости, перпендикулярной щели спектрометра, с которым интерферометр был скрещен. Призмный спектрометр ИСП-51 был применен как спектрометр предварительной дисперсии. Щель спектрометра имела ширину 5 мкм и высоту 0,5 мм. Плоскость щели совпадала с плоскостью локализации полос равного наклона, т. е. с фокальной плоскостью объектива с фокусным расстоянием, равным 30 см. Таким образом, интенсивность света, пропущенного интерферометром, как функция угла наклона преобразовалась в функцию времени. Последняя в свою очередь преобразовалась

в функцию координат ленты приставки ФЭП-1. Записи последней функции представлены на рис. 3 и 4.

Интерферограмма рис. 3 была записана, когда главное сечение клина совпадало с плоскостью вращения. При записи интерферограммы рис. 4 главное сечение клина было перпендикулярно плоскости вращения. Обе интерферограммы состоят из узких полос, которые подвергаются модуляции в виде широких полос. Узкие полосы принадлежат среднему воздушному слою высокой добротности, а широкие полосы принадлежат стеклянным слоям с низкой добротностью. Интерферограмма рис. 3 имеет ту особенность, что глубина модуляции изменяется от одной стороны интерферограммы к другой. По этой

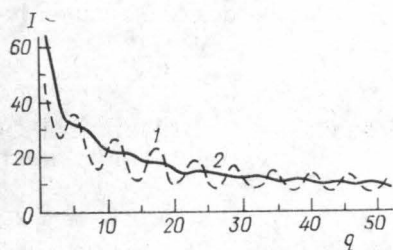


Рис. 5. Экспериментальное соотношение между интенсивностью I угловых максимумов среднего слоя и их номерами

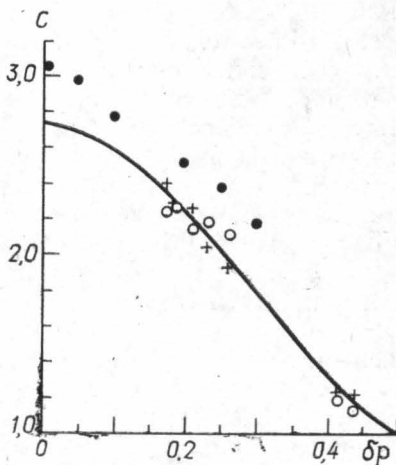


Рис. 6. Экспериментальное (точки) и теоретическое (сплошная кривая) соотношения между глубиной модуляции и относительным смещением полос первого и третьего слоев

интерферограмме хорошо заметно, что широкие полосы подавляются на одной стороне и усиливаются на другой стороне. Глубина модуляции интерферограммы рис. 4 везде одинакова. Преимущество интерферограммы с переменной глубиной модуляции заключается в том, что подавленные и усиленные полосы сопоставляются в одном и том же масштабе интенсивности.

Контуры неподдавленных и подавленных широких полос представлены на рис. 5 с помощью кривых 1 и 2 соответственно. Эти кривые представляют собой соотношение между максимальной интенсивностью (в произвольном масштабе интенсивности I) угловых порядков среднего воздушного слоя и номерами q этих полос. Из рис. 5 следует, что кривая подавленных полос лежит по масштабу интенсивности в середине между максимумами и минимумами неподдавленных полос. Кривые рис. 5 дают возможность построить экспериментальное соотношение между контрастностью C полос, обусловленных взаимодействием стеклянных слоев, и относительным смещением δr . Это соотношение сопоставляется с теоретическими расчетами для того, чтобы точно установить выражение для резонансного контура многослойного интерферометра.

На рис. 6 кресты и светлые кружки определяют значения контрастности, которые измерены по двум интерферограммам с переменной глубиной модуляции. Относительное смещение δr определено с помощью формулы (1). На том же рисунке жирные кружки опреде-

ляют контрастность широких полос по шести интерферограммам с постоянной глубиной модуляции. В последнем случае относительное смещение $\delta\rho$ равно разнице дробей центральных порядков отдельных стеклянных пластин. Изменение $\delta\rho$ от одной интерферограммы к другой производилось с помощью изменения положения общей оси входной и выходной апертур относительно оси интерферометра с общей апертурой, равной 50 мм. Сплошная кривая на рис. 6 определяет теоретический ход изменения контрастности по интерферограмме с переменной глубиной модуляции. Данные рис. 6 приводят к следующим выводам.

В случае перпендикулярности главного сечения клина плоскости вращения значения контрастности (темные кружки) выше, нежели в случае параллельности главного сечения клина плоскости вращения (кресты и светлые кружки). В первом случае плоскость отражения наклонных пучков не совпадает с главным сечением клина, где угол расхождения интерферирующих плоских волн имеет наименьшее значение. Во втором случае плоскость отражения и главное сечение клина совпадают, и угол расхождения имеет наивысшее значение, равное 2α . Уменьшение угла расхождения приводит к увеличению контрастности, приближаясь к контрастности полос плоскопараллельного слоя.

Экспериментальные и теоретические значения контрастности совпадают, что свидетельствует о точности формулы резонансного контура, которая рассматривается в следующем параграфе.

Резонансный контур. Резонансный контур трехслойного интерферометра (см. рис. 6) можно вывести из произведения резонансных контуров составляющих слоев интерферометра. Этот контур объясняет с большей степенью точности изменение глубины модуляции с изменением относительного сдвига резонансных максимумов составляющих слоев. В качестве резонансного контура каждого составляющего слоя примем функцию Эри:

$$A(k, \gamma) = \left[1 + \frac{\sin^2 \Phi/2}{\text{sh}^2 \gamma/2} \right]^{-1}. \quad (2)$$

Функция (2) нормирована так, что ее резонансный максимум равен единице. В (2) вводятся следующие обозначения. Разность фаз $\Phi = 2(k - k_0)l$, где k — волновое число, l — оптическая толщина слоя. Если δ, δ' — скачки фаз при отражении внутри слоя, то k_0 определяется равенством $2k_0l + \delta + \delta' = 2p$, где целое число p — порядок интерференции. Величина γ определяется формулой $\gamma = \ln R$, где R — энергетический эффективный коэффициент отражения данного слоя. Величина γ представляет собой коэффициент затухания разделенных внутри слоя интерферирующих волн. Коэффициент затухания играет большую роль при определении параметров резонансного контура.

Элементарный анализ функции (2) показывает, что резонансный минимум равен $\text{th}^2 \gamma/2$ и частотная полуширина резонансного контура равна γ . Это значит, что чем меньше γ , тем уже резонансный контур и тем ниже его минимум.

Для удобства записи резонансного контура трехслойного интерферометра мы приписываем функции Эри индексы, которые различают функции Эри. Так, функция Эри единичного слоя обозначается через A_j , где j — номер заданного слоя. Функция Эри $A_{j(j+m)}$ определяет резонансный контур полости интерферометра, которая охватывает слои номера j и $j+m$ вместе с $(m-1)$ слоями между ними. Разность фаз функции $A_{j(j+m)}$ равна сумме разностей фаз заданных $(m+1)$ слоев, и ее коэффициент затухания увеличивается за счет прохождения всех

средних границ раздела. Учитывая все эти обозначения, можно записывать резонансный контур трехслойного интерферометра в виде

$$T = A_1 A_2 A_3 A_{12} A_{23} A_{13}. \quad (3)$$

Надо отметить, что (3) вытекает из экспериментальных наблюдений с трехслойным интерферометром со смежными слоями низких добротностей (рис. 1, б, в). В том случае, когда средний слой обладает высокой добротностью (рис. 1, а), формула (3) примет простой вид

$$T = A_1 A_2 A_3, \quad (4)$$

поскольку функции сложных слоев в (3) стремятся к единицам ввиду высоких потерь при прохождении через границы раздела с низкими пропусканиями. Функция (4) представляет собой исходную формулу для вычисления зависимости глубины модуляции интерферограммы от относительного смещения полос наружных слоев. В случае наблюдения над максимумами среднего слоя (4) приводит к формуле контрастности

$$C = \frac{\left(\operatorname{sh}^2 \frac{\gamma_1}{2} + \cos^2 \pi \frac{\delta p}{2} \right) \left(\operatorname{sh}^2 \frac{\gamma_3}{2} + \cos^2 \pi \frac{\delta p}{2} \right)}{\left(\operatorname{sh}^2 \frac{\gamma_1}{2} + \sin^2 \pi \frac{\delta p}{2} \right) \left(\operatorname{sh}^2 \frac{\gamma_3}{2} + \sin^2 \pi \frac{\delta p}{2} \right)}. \quad (5)$$

Формула (5) справедлива для плоскопараллельных слоев. Ниже показывается, как вычисляется контрастность в случае клиновидных пластин. Согласно (5) контрастность широких полос модуляции уменьшается с увеличением относительного смещения резонансных максимумов наружных слоев. Максимальное значение контрастности

$$C_{\max} = \operatorname{cth}^2 \frac{\gamma_1}{2} \operatorname{cth}^2 \frac{\gamma_3}{2} \quad (6)$$

получится при совпадении резонансных контуров, т. е. при подстановке $\delta p = 0$. Минимальное значение контрастности $C_{\min} = 1$ получится при подстановке $\delta p = 0,5$, т. е. когда максимум одного контура совпадает с минимумом другого контура.

В случае клиновидных слоев функция Эри (2) заменяется функцией (7) [3]:

$$A' = \operatorname{th} \frac{\gamma}{2} \left\{ 1 + \frac{1}{2\pi f} \left[\operatorname{arctg} \frac{\sin(2\pi f + \Phi)}{e^\gamma - \cos(2\pi f + \Phi)} + \operatorname{arctg} \frac{\sin(2\pi f - \Phi)}{e^\gamma - \cos(2\pi f - \Phi)} \right] \right\}. \quad (7)$$

В этой формуле отношение угла расхождения плоских интерферирующих волн к углу первого дифракционного минимума определяется равенством $f = 2a/(\lambda/D)$, где D — ширина прямоугольной выходной апертуры. Резонансный контур (7) применен для вычисления сплошной кривой рис. 6. Из этого рисунка видно, что теоретические расчеты совпадают в пределах экспериментальных ошибок с измеренными значениями. Погрешность экспериментальных значений обусловлена главным образом локальными деформациями использованных пластин. Эти деформации наблюдались в интерферограммах полос равной толщины. Следовательно, оптические толщины стеклянных пластин не имели чисто линейного изменения. Отступление от линейной зависимости определяется отношением площади рабочей поверхности пластины к пло-

щади выходной апертуры. В нашем эксперименте площадь рабочей поверхности задней пластины составляла $2,5 \text{ см}^2$ при площади выходной апертуры, равной 1 см^2 . Совокупность темных точек рис. 6 указывает на тот факт, что значение контрастности увеличивается по мере уменьшения угла клина так, что в конечном счете контрастность определяется формулой (5).

Интерферометр с тремя толстыми слоями из воздуха и стекла и тонкослойными чередующимися покрытиями из ZnS и криолита является многослойным интерферометром, состоящим из чисто диэлектрических слоев. Резонансный контур многослойного интерферометра, который состоит из тонких слоев, обычно определяется из интерферограммы равных хроматических порядков при работе со сплошным спектром.

Многослойный интерферометр с толстыми слоями дает возможность исследовать резонансный контур в монохроматическом свете. Преимущество введения толстых слоев в состав многослойного интерферометра заключается в том, что угловые области дисперсии толстых слоев во много раз меньше областей дисперсии тонких слоев. Ввиду этого обстоятельства полосы пропускания интерферометра сканируются в угловых порядках, что позволяет исследовать интерференционное взаимодействие слоев интерферометра.

В настоящей работе это взаимодействие наблюдается в виде изменения глубины модуляции интерферограммы в зависимости от относительного смещения полос пропускания составляющих слоев. Следует отметить, что эту зависимость трудно получить для многослойного интерферометра из тонких слоев, поскольку тонкие покрытия обладают фиксированными полосами пропускания. Количественный анализ этой зависимости представляет большой интерес при выводе эмпирической формулы для резонансного контура многослойного интерферометра.

В заключение автор приносит благодарность проф. Ф. А. Королеву за обсуждения и постоянное внимание при выполнении данной работы.

ЛИТЕРАТУРА

1. Khashan M. «Opt. Commun.», 1974, 11, 213.
2. Хашан М. «Изв. вузов. Физика», 1970, № 4, 35.
3. Хашан М. «Изв. вузов. Физика», 1967, № 3, 73.

Поступила в редакцию
1.7 1977 г.
Кафедра
оптики и спектроскопии