

ФОРМИРОВАНИЕ ФРОНТА СВЕТОВОЙ ВОЛНЫ
В ИНТЕРФЕРОМЕТРЕ ФАБРИ—ПЕРО*А. Г. Жиглинский, С. Г. Парчевский и Э. С. Пугилин*

Изучена возможность формирования постоянной разности фаз, интерферирующих в интерферометре Фабри—Перо лучей с помощью диэлектрических зеркал. Для интерферометра Фабри—Перо, образованного семислойными четвертьволновыми зеркалами, данный подход позволил уменьшить изменение по радиусу интерферометра разности фаз интерферирующих лучей в 5–6 раз.

Трудности извлечения информации о контуре спектральной линии, изучаемой с помощью интерферометра Фабри—Перо (ИФП), связаны с отступлением его аппаратной функции от функции Эри. Последнее вызвано тем, что разность фаз лучей, интерферирующих в реальном интерферометре, меняется по поверхности зеркал ИФП, которые обычно не обладают плоской поверхностью. Величину указанной разности фаз можно изменять путем изменения толщины диэлектрических многослойных зеркал. Изменение распределения толщины зеркал приведет к изменению распределения разности фаз по поверхности интерферометра как за счет изменения расстояния между зеркалами, так и за счет изменения сдвига фаз при отражении от них. Этим обстоятельством можно воспользоваться для формирования в ИФП такого волнового фронта, который обеспечивал бы постоянство разности фаз интерферирующих лучей по всей поверхности интерферометра.

Ранее Неллтые, Шаббаль и Джакомо [1] рассчитали, как изменится оптическая толщина ИФП при изменении толщины одного из слоев семислойного диэлектрического зеркала. Оказалось, что при коррекции таким способом разности фаз интерферирующих в ИФП лучей всего лишь на 0.06 полюсы коэффициент отражения R уменьшается почти на 20%, что приводит к уменьшению разрешающей способности ИФП (при $R=0.93$) почти в 4 раза. В то же время за счет подлежащего исправлению недостатка разрешающая сила ИФП уменьшалась примерно в 5 раз. Ясно, что такая корректировка волнового фронта неэффективна. Работа продолжения не имела.

В нашей работе предлагается производить формирование волнового фронта в ИФП путем одновременного изменения толщины всех слоев многослойного диэлектрического зеркала. При этом деформация волнового фронта на величину, большую чем в [1] на порядок (для семислойного зеркала, аналогичного рассчитанному в работе [1]), приводит к изменению коэффициента отражения не более чем на 4%. Необходимое радиальное распределение толщины покрытий для обоих зеркал, в отличие от того, как это делалось в работе [1], попытаемся формировать одновременно, что предпочтительнее для практических применений. Рассмотрим формирование интерференционной картины в ИФП с четвертьволновыми диэлектрическими зеркалами, нанесенными на осесимметричные подложки.

Если зеркала имеют одно и то же радиальное распределение толщины, то разность фаз $\sigma(\rho)$ между соседними интерферирующими лу-

лучами, прошедшими через интерферометр на расстоянии ρ от оси (рис. 1), определяется следующим выражением:

$$\sigma(\rho) = 2nd(\rho) \frac{2\pi}{\lambda} + 2\psi(\rho), \quad (1)$$

где n — показатель преломления среды, расположенной между зеркалами (в нашем случае $n=1$); $d(\rho)$ — расстояние между зеркалами интерферометра; $\psi(\rho)$ — скачок фазы между отраженной и падающей на покрытие волнами; λ — длина световой волны.

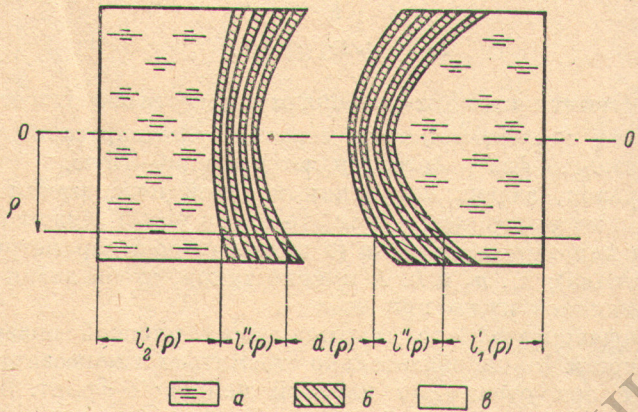


Рис. 1. К расчету разности фаз интерферирующих в интерферометре Фабри—Перо лучей.

OO' — оптическая ось, a — подложка, b — слои с высоким показателем преломления, c — слои с низким показателем преломления.

Отсюда форма поверхности, описывающей изменение разности фаз интерферирующих лучей по радиусу $\Delta\sigma(\rho)$, определяется выражением

$$\Delta\sigma(\rho) = 2\Delta d(\rho) \frac{2\pi}{\lambda} + 2\Delta\psi(\rho), \quad (2)$$

где

$$\Delta\sigma(\rho) \equiv \sigma(\rho) - \sigma(0),$$

$$\Delta d(\rho) = \Delta l'_1(\rho) + \Delta l'_2(\rho) + 2\Delta l''(\rho),$$

$\Delta l'_i = l'_i(\rho) - l'_i(0)$ — отклонение поверхности подложки от плоскости, номер подложки $i=1, 2$, $\Delta l''(\rho) = l''(\rho) - l''(0)$ — изменение толщины зеркала по радиусу, $\Delta\psi(\rho) = \psi(\rho) - \psi(0)$ — изменение скачка фазы на границе воздух—зеркало при отражении.

Для реализации максимальной контрастности, светосилы и разрешающей силы интерферометра Фабри—Перо необходимо, чтобы отклонение от плоскости поверхности, описывающей изменение разности фаз по радиусу $\Delta\sigma(\rho)$, было равно нулю. Будем говорить в таком случае, что «поверхность постоянной разности фаз должна быть плоской».

Тогда условие (2) может быть записано в виде

$$[\Delta l'_1(\rho) + \Delta l'_2(\rho) + 2\Delta l''(\rho)] \frac{2\pi}{\lambda} + \Delta\psi(\rho) = 0. \quad (3)$$

Вспользуемся выражениями для $\Delta l''(\rho)$ и $\Delta\psi(\rho)$, приведенными в работе [2] в виде

$$\left. \begin{aligned} \Delta l''(\rho) &= \left(\frac{k-1}{2n_1} + \frac{k+1}{2n_2} \right) \frac{\lambda_0}{4} \frac{\Delta t(\rho)}{t(0)}, \\ \Delta\psi(\rho) &= a \frac{\Delta t(\rho)}{t(0)}. \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

Здесь λ_0 — длина волны, при которой коэффициент отражения зеркала максимален, n_1, n_2 — показатели преломления материалов слоев, k — число слоев четвертьволнового диэлектрического зеркала, константа a рассчитана, например, в [3],

$$\frac{\Delta t(\rho)}{t(0)} = \frac{n_j d_j(\rho) - n_j d_j(0)}{n_j d_j(0)},$$

j — номер четвертьволнового слоя. Подставив (4) в (3), получим

$$[\Delta L_1(\rho) + \Delta L_2(\rho)] \frac{2\pi}{\lambda} + \left[\left(\frac{k-1}{2n_1} + \frac{k+1}{2n_2} \right) \frac{\pi\lambda_0}{\lambda} + a \right] \frac{\Delta t(\rho)}{t(0)} = 0 \quad (5)$$

или

$$\Delta\sigma_1(\rho) + \Delta\sigma_2(\rho) = 0, \quad (5')$$

где $\Delta\sigma_1(\rho)$ описывает влияние отклонения от плоскости поверхности подложек, а $\Delta\sigma_2(\rho)$ — вклад четвертьволновых зеркал в формирование поверхности постоянной разности фаз в интерферометре Фабри—Перо.

Таким образом, задача получения плоской поверхности постоянной разности фаз в интерферометре, как это видно из (5), может быть решена путем выбора параметров зеркала (в нашем случае параметров четвертьволнового зеркала): n_1, n_2 и k . А именно таких, чтобы левая часть уравнения (5) равнялась нулю при всех ρ .

Следует подчеркнуть, что для получения плоской поверхности постоянной разности фаз не обязательно стремиться к нанесению покрытий, формирующих при отражении плоский волновой фронт. Поверхность подложек может быть неплоской, слой, образующие зеркало, переменной по радиусу толщины, волновой фронт, отраженный от каждого зеркала, неплоским, а разность фаз интерферирующих лучей в любой точке зеркала интерферометра при выполнении условия (5) остается постоянной.

Следует отметить, что в интервале длин волн, где $a \sim 1/\lambda$, т. е. в окрестности главного максимума отражения четвертьволновых диэлектрических зеркал, форма поверхности постоянной разности фаз интерферометра будет оставаться неизменной, так как в выражении (5) исчезает зависимость от длины волны. Таким образом, зеркало корректирует дефекты подложки в том же спектральном интервале, в котором оно обладает максимальным отражением.

Вышеизложенное позволяет сформулировать метод формирования плоской поверхности постоянной разности фаз лучей, прошедших через интерферометр Фабри—Перо: по измеренным $\Delta L_1'(\rho)$ и $\Delta L_2'(\rho)$ и известным k, n_1, n_2 и a пишутся такие условия формирования слоев, чтобы при полученном изменении толщины слоев по радиусу $\Delta t(\rho)/t(0)$ выполнялось условие (5) (о нанесении тонких слоев переменной по радиусу толщины см. работу [4]).

Проиллюстрируем возможности метода на примере коррекции волнового фронта в интерферометре Фабри—Перо с семислойными четвертьволновыми зеркалами. Радиальная зависимость отклонения поверхности подложек от плоскости $\Delta L_1'(\rho)$ и $\Delta L_2'(\rho)$, измеренная на установке, описанной в работе [2], представлена на рис. 2, а и б (кривая I), а на рис. 2, в (кривая II) — радиальная зависимость суммарного отклонения $\Delta\sigma_1(\rho)$.

Далее, из семейства расчетных кривых для радиальной зависимости изменения разности фаз $\Delta\varphi(\rho)$ волны при отражении семислойным зеркалом была выбрана наиболее подходящая для коррекции волнового фронта (она приведена на рис. 3). Эта кривая, будучи умножена на 2 и сложена алгебраически с кривой $\Delta\sigma_1(\rho)$, дает в сумме кривую, максимально близкую к оси абсцисс. Параметры испарительной установки, при которых была получена выбранная кривая (рис. 3), реализовалась затем в эксперименте.

Радиальное распределение изменения разности фаз зеркал, полученных методом термического испарения в вакууме при выбранной геометрии установки, приведено на рис. 2. Кривые II на рис. 2, а и б описывают радиальное изменение формы волнового фронта $\Delta\varphi_1(\rho)$ и $\Delta\varphi_2(\rho)$.

отраженного зеркалами, нанесенными на первую и вторую подложку соответственно. Кривая II на рис. 2, в описывает радиальное распределение изменения разности фаз лучей, интерферирующих в интерферометре Фабри—Перо, который образован изготовленными зеркалами. Из рис. 2, в видно, что совпадение экспериментальных данных (точки вблизи кривой II) с расчетными (сплошная кривая II) удовлетворительное.

Сравнение кривых I и II рис. 2, в показывает, что при формировании плоской поверхности постоянной разности фаз с помощью четвертьволно-

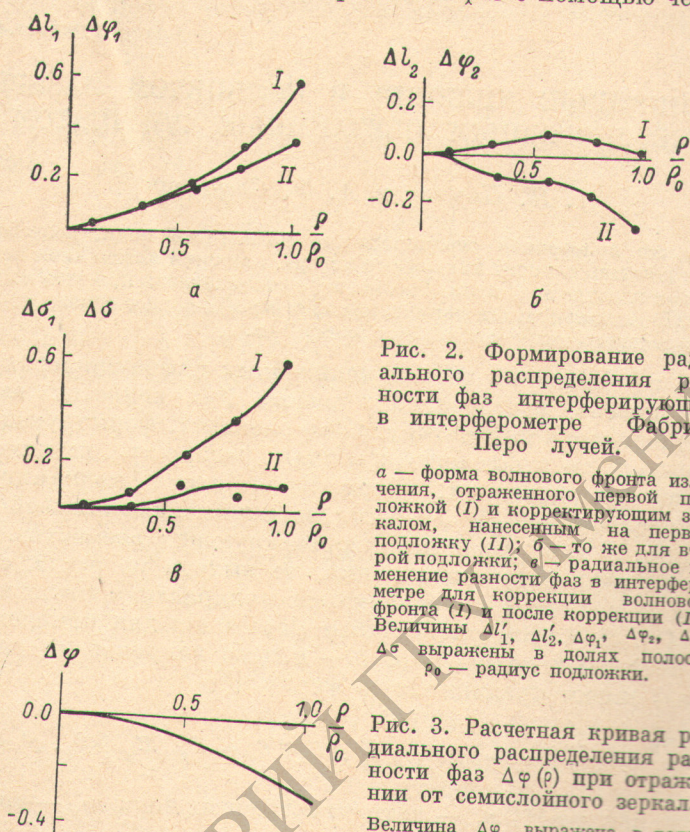


Рис. 2. Формирование радиального распределения разности фаз интерферирующих в интерферометре Фабри—Перо лучей.

а — форма волнового фронта излучения, отраженного первой подложкой (I) и корректирующим зеркалом, нанесенным на первую подложку (II); б — то же для второй подложки; в — радиальное изменение разности фаз в интерферометре для коррекции волнового фронта (I) и после коррекции (II). Величины $\Delta l'_1$, $\Delta l'_2$, $\Delta \varphi_1$, $\Delta \varphi_2$, $\Delta \sigma_1$, $\Delta \sigma_2$ выражены в долях полосы; ρ_0 — радиус подложки.

Рис. 3. Расчетная кривая радиального распределения разности фаз $\Delta \varphi(\rho)$ при отражении от семислойного зеркала. Величина $\Delta \varphi$ выражена в долях полосы.

вых диэлектрических зеркал удается значительно уменьшить изменение разности фаз интерферирующих в интерферометре Фабри—Перо лучей. В наших экспериментах это уменьшение достигало 5÷7 раз.

Величина спектрального интервала, в котором разность фаз интерферирующих в интерферометре Фабри—Перо лучей остается постоянной по радиусу зеркал, согласно нашим расчетам составляет для семислойного зеркала примерно $(0.93-1.07) \lambda_0$ при коррекции дефектов подложки около 0.2 полосы. При этом величина коэффициента отражения мало изменяется по радиусу (от 0.935 до 0.920). Таким образом, впервые получена возможность формировать разность фаз интерферирующих лучей с помощью четвертьволновых зеркал в значительных пределах без потери отражающих свойств зеркал.

Литература

- [1] E. Pelletier, R. Chabbal, P. Giacomo. J. Phys., 25, 275, 1964.
- [2] А. Г. Жиглинский, Э. С. Путилин. Опт. и спектр., 32, 1176, 1972.
- [3] Г. В. Розенберг. Оптика тонкослойных покрытий. М., 1958.
- [4] А. Г. Жиглинский, Э. С. Путилин. Опτικο-механич. промышл., 9, 46, 1971.

Поступило в Редакцию 23 июля 1976 г.