

ИНТЕРФЕРОМЕТРИЧЕСКИЙ МЕТОД ИЗМЕРЕНИЯ КЛИНОВИДНОСТИ ПЛАСТИН

© 2007 г. Б. Е. Мошкин, канд. техн. наук; Б. С. Майоров

Институт космических исследований РАН, Москва

E-mail: Moshkin@irn.iki.rssi.ru, Bogdan@irn.iki.rssi.ru

Описан простой способ определения клиновидности прозрачных пластин по смещению интерференционных колец. Приведены формулы и программа расчета.

Коды OCIS: 120.4630, 220.4840, 120.2650.

Поступила в редакцию 10.05.2006.

При разработке и сборке оптико-электронных приборов очень часто в качестве входных и выходных окон, фильтров и т. д. используются плоскопараллельные пластины из различных материалов. Большое значение при этом имеет реальный угол клиновидности таких пластин, влияющий на настройку, а часто и на параметры прибора. Существует известное оборудование, позволяющее измерять клиновидность пластин. Наиболее точные измерения выполняют с помощью гониометров [1], которые представляют собой сложные приборы, позволяющие проводить измерения углов с очень высокой точностью. Кроме того, известны интерферометрические методы контроля клиновидности пластин, использующие интерферометр Физо [1, 2]. Во всех этих случаях используется достаточно сложная стационарная аппаратура, которая не всегда может находиться на месте сборки и юстировки прибора. Авторы предлагают более простой способ, позволяющий провести измерения этого параметра с достаточно высокой точностью, чаще всего удовлетворяющей требованиям, предъявляемым при сборке оптико-электронных приборов. Для этих измерений необходимы всего лишь лазер видимого диапазона, микролинза, экран и линейка.

Рассмотрим прозрачную пластину с углом клина α между ее плоскими поверхностями (рис. 1).

При освещении пластины пучком света от лазера, расходящимся после микролинзы, на плоском экране наблюдается интерференционная картина, образованная сложением волновых фронтов, отраженных от передней и задней поверхностей пластины [3].

Оптическая ось микролинзы совпадает с осью пучка лазера и перпендикулярна передней поверхности пластины и экрану. При малых углах клина интерференционная картина представляет собой систему почти круговых колец, центр которых смещен в направлении увеличения толщины пластины относительно оси микролинзы (критерий малости угла будет ясен ниже). В основу расчетов положен тот факт, что геометрический центр колец, отвечающий условию максимальной оптической разности хода, лежит на прямой, соединяющей зеркальные отражения центра линзы (точки O' и O'') в обеих поверхностях пластины. Таким образом, задача решается в рамках геометрической оптики. Угловое смещение центра колец от оси ω определяется клиновидностью пластины α и зависит от показателя преломления n (на длине волны лазера), толщины пластины h (на оси) и расстояния l между передней поверхностью пластины и микролинзой. Полагаем, что микролинза находится в плоскости экрана, тогда линейное смещение центра колец на экране

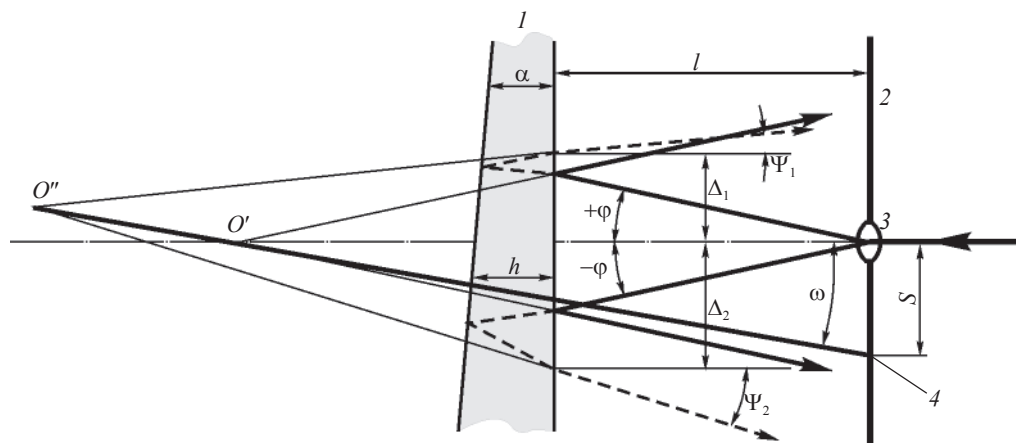


Рис. 1. Схема эксперимента. 1 – пластина, 2 – экран, 3 – микролинза, 4 – центр колец.

$S = 2l\omega$. В принципе, смещение центра зависит и от углов падения лучей φ , но, как будет показано ниже, при не слишком больших углах эта зависимость слабая и ею можно пренебречь.

Для расчета положения мнимых источников O' и O'' первоначально использовались два симметричных относительно оси луча с углами $+\varphi$ и $-\varphi$, где φ (порядка нескольких градусов) – некоторый средний угол для конуса лучей, выходящих из микролинзы.

В зависимости от значения вышеописанных параметров возможны различные случаи распространения светового луча. При больших углах α (десят-

ки градусов) и столь же больших углах падения лучей φ возможны случаи, когда луч, прошедший через переднюю поверхность, не выйдет обратно к экрану и интерференции не будет.

Используя законы отражения и преломления, найдем, что угол выхода луча после внутреннего отражения от задней поверхности пластины через ее переднюю поверхность составляет

$$\psi = \arcsin\left(\sin\varphi \cos 2\alpha - \sqrt{n^2 - \sin^2\varphi} \sin 2\alpha\right), \quad (1)$$

а расстояние от оси до точки выхода

$$\Delta = \frac{l \operatorname{tg}\varphi \sqrt{n^2 - \sin^2\varphi} + h \sin\varphi - h \sqrt{n^2 - \sin^2\varphi} \sin 2\alpha + h \sin\varphi \cos 2\alpha}{\sin\varphi \sin 2\alpha + \sqrt{n^2 - \sin^2\varphi} \cos 2\alpha}. \quad (2)$$

Мнимый источник O'' определяется как точка пересечения продолжения двух лучей, которые зада-

ны углами наклона ψ_1, ψ_2 и точками выхода из пластины $(0, \Delta_1), (0, \Delta_2)$, причем

$$\operatorname{tg}\Psi_1 = \frac{\sin\varphi \cos 2\alpha - \sqrt{n^2 - \sin^2\varphi} \sin 2\alpha}{\sqrt{1 - \frac{n^2}{2} + \left(\frac{n^2}{2} - \sin^2\varphi\right) \cos 4\alpha + \sin\varphi \sqrt{n^2 - \sin^2\varphi} \sin 4\alpha}}, \quad (3)$$

$$\Delta_1 = \frac{l \operatorname{tg}\varphi \sqrt{n^2 - \sin^2\varphi} + h \sin\varphi - h \sqrt{n^2 - \sin^2\varphi} \sin 2\alpha + h \sin\varphi \cos 2\alpha}{\sin\varphi \sin 2\alpha + \sqrt{n^2 - \sin^2\varphi} \cos 2\alpha}, \quad (4)$$

$$\operatorname{tg}\Psi_2 = -\frac{\sin\varphi \cos 2\alpha + \sqrt{n^2 - \sin^2\varphi} \sin 2\alpha}{\sqrt{1 - \frac{n^2}{2} + \left(\frac{n^2}{2} - \sin^2\varphi\right) \cos 4\alpha - \sin\varphi \sqrt{n^2 - \sin^2\varphi} \sin 4\alpha}}, \quad (5)$$

$$\Delta_2 = -\frac{l \operatorname{tg}\varphi \sqrt{n^2 - \sin^2\varphi} + h \sin\varphi + h \sqrt{n^2 - \sin^2\varphi} \sin 2\alpha + h \sin\varphi \cos 2\alpha}{\sqrt{n^2 - \sin^2\varphi} \cos 2\alpha - \sin\varphi \sin 2\alpha}. \quad (6)$$

Мнимый источник O' в выбранной системе координат, очевидно, имеет координаты $(-l, 0)$.

Угол смещения центра интерференционной картины определяется как

$$\omega = \arctg\left(\frac{\operatorname{tg}\Psi_H \Delta_B - \operatorname{tg}\Psi_B \Delta_H}{\Delta_B - \Delta_H + (\operatorname{tg}\Psi_H - \operatorname{tg}\Psi_B)l}\right). \quad (7)$$

Эта формула выражает зависимость углового положения центра колец ω от параметров пластины α, n, h и параметров измерительной установки φ, l .

Анализ численных расчетов по этим формулам привел к следующим выводам.

Во-первых, при малых значениях α ($\alpha < 1^\circ$) зависимость функции $\omega(\alpha)$ от углов падения φ при изменении последних внутри конуса с полууглом $\varphi_{\max} \leq 10^\circ$ весьма слабая и ею можно пренебречь. Это свойство обеспечивает высокий контраст интерференционных колец и их почти круговую форму (что и наблюдается) и подтверждает возможность использования для расчета двух симметричных лучей. Кроме того, это свойство позволяет не забо-

таться о строгой перпендикулярности пластины к оси падающего пучка лучей и о стабильности ее положения при измерении. Достаточно пластину держать просто в руке – положение колец остается всегда неподвижным.

Во-вторых, зависимость $\omega(\alpha)$ при малых значениях α линейна.

Конкретный вид этой зависимости, полученной аппроксимацией результатов расчетов при малой клиновидности и приведенной к виду, удобному для расчетов, описывается формулой:

$$\alpha = \frac{h}{ln^2} \omega = \frac{h}{2l^2 n^2} S. \quad (8)$$

Эта простая формула верна с погрешностью около 5% при $\alpha < 1'$, $h = 1-10$ мм, $l = 100-300$ мм и $n = 1,4-2,3$. При больших углах α область применения формулы (8) в координатах h , l и n сужается и для расчетов клиновидности следует пользоваться описанной ниже программой.

Кстати, расчеты по программе при произвольно выбранных углах φ подтвердили справедливость формулы (8) при указанных выше ограничениях.

При увеличении толщины пластины h смещение центра колец линейно уменьшается, но одновременно уменьшаются радиус и толщина колец и увеличивается число видимых на экране колец, так что погрешность измерений слабо зависит от толщины пластины. Следует повторить, что смещение центра колец на плоскости экрана происходит в направлении увеличения толщины пластины. В случае малых углов всегда можно определить положение центра интерференционной картины с достаточной точностью, используя несколько колец, ближайших к центру.

Для более точных расчетов, особенно при больших клиновидности и толщине пластины, следует применять программу, размещенную (и доступную для скачивания) на сайте Института космических исследований РАН <http://spectrum.iki.rssi.ru/optics/index.html>. Эта программа ведет расчеты как при симметричной паре углов φ , так и при произвольно заданных углах.

Использованная нами установка для измерения клиновидности пластин состоит из гелий-неонового лазера, экрана, в центре которого установлена микролинза диаметром 2 мм и с фокусным расстоянием 5 мм, столика для установки пластины, а также цифрового фотоаппарата, используемого для измерения смещения с помощью компьютера. На экране нанесены концентрические окружности с шагом 5 мм.

На рис. 2 и 3 приведены фотографии интерференционных картин, образованных при отражении от кварцевой пластины с клиновидностью $7''$ и флюо-

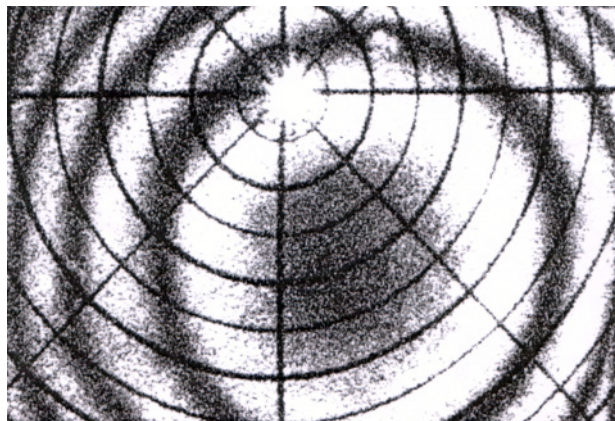


Рис. 2. Интерференционная картина от кварцевой пластины ($h = 4$ мм, $n = 1,45$, $l = 700$ мм, $S = 18$ мм).

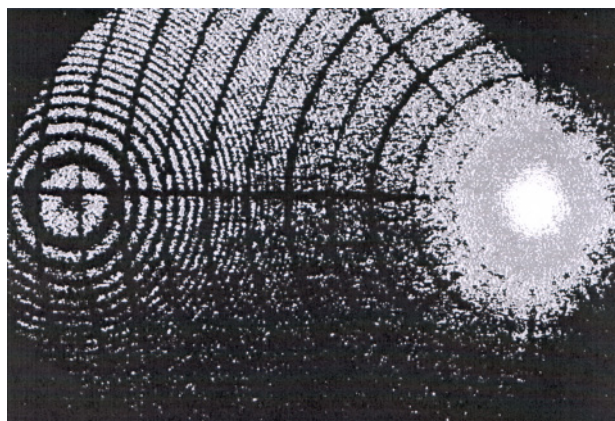


Рис. 3. Интерференционная картина от флюоритовой пластины ($h = 4,9$ мм, $n = 1,43$, $l = 210$ мм, $S = 56$ мм).

ритовой пластины с клиновидностью $5'$. При клиновидности свыше $1'-2'$ центр колец, возможно, окажется вне освещенной части экрана. Тогда следует наклоном пластины сместить по экрану световое пятно в сторону центра колец, как показано на рис. 3.

Для оценки погрешности определялась клиновидность пластин из кварца, флюорита и бромистого калия в диапазоне углов от $7''$ до $5'$. Измерения проводились как гониометром FPM-2", так и интерферометрическим методом при различных расстояниях l . Среднеквадратическая величина разброса результатов не превышает 7%, что, конечно, уступает гониометрическому методу, но чаще всего вполне достаточна для сборки большинства оптико-электронных приборов.

Преимущество описанного метода состоит в простоте приборной реализации (по сравнению, например, с гониометрами или интерференционными приборами ИЗК-461 или "Меопта" [1]) и возможности проведения экспресс-контроля: не выпуская пластину из рук, можно сразу оценить направление клина и его величину, а по отклонению формы ко-

лец от окружности – величину и характер неплоскостности поверхностей.

ЛИТЕРАТУРА

1. Справочник технолога-оптика / Под ред. Окатова М.А. СПб.: Политехника, 2004. 679 с.

2. *Малакара Д.* Оптический производственный контроль / Пер. с англ. под ред. Соснова А.Н. М.: Машиностроение, 1985. 400 с.

3. *Коломийцев Ю.В.* Интерферометры. Основы инженерной теории. Применение. Л.: Машиностроение, 1976. 296 с.
