



СПЕЦИАЛЬНЫЙ ОПТИЧЕСКИЙ ПРАКТИКУМ

Л. И. Голубенцева
В. П. Рябухо

Лазерный призмный интерферометр



Саратовский ордена Трудового Красного Знамени
государственный университет им. Н.Г.Чернышевского
Институт проблем точной механики и управления
Российской академии наук

Л. И. Голубенцева В. П. Рябухо

СПЕЦИАЛЬНЫЙ ОПТИЧЕСКИЙ ПРАКТИКУМ

ЛАЗЕРНЫЙ ПРИЗМЕННЫЙ ИНТЕРФЕРОМЕТР

Учебно-методическое руководство к лабораторной работе

КАФЕДРА ОПТИКИ
САРАТОВСКОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО УНИВЕРСИТЕТА

2000

ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ ЧАСТЬ

Применение явления интерференции. Интерферометрия

Явление интерференции света широко используется в науке и технике. Поскольку количественные закономерности интерференции определяются длиной волны света, показателем преломления среды и разностью хода световых лучей, это явление применяется для определения спектрального состава излучения (интерференционная спектроскопия), измерения показателей преломления прозрачных тел (интерференционная рефрактометрия), а также для измерения формы линейных размеров тел и параметров их перемещения (интерферометрия).

Под оптической интерферометрией обычно понимают совокупность методов измерения и контроля, основанных на явлении интерференции света. В этих методах осуществляется сложение объектной световой волны, отраженной поверхностью исследуемого объекта или прошедшего через объект, с опорной волной сравнения, отраженной от эталонной поверхности. В области наложения указанных волн образуется интерференционная картина, которая служит источником измерительной информации. Параметры интерференционной картины - пространственный период и форма полос - отражают отличия в формах контролируемой и эталонной поверхностей. Измеряя данные параметры, можно определить, в частности, форму исследуемого объекта, если известна форма эталонной поверхности. Перемещение объекта сопровождается изменением положения полос интерференционной картины. По параметрам этого динамического интерференционного сигнала определяют параметры движения объекта.

Интерференционные методы обладают чрезвычайно высокой чувствительностью, поскольку в них производится сравнение измеряемой величины с длиной волны света, которая составляет доли микрометра (например, для зеленого света $\lambda = 550$ нм).

Оптическая схема призмного интерферометра

В настоящей работе для контроля формы полированных пластин используется призмный интерферометр, оптическая схема которого изображена на рис.1. Источником излучения служит гелий-неоновый лазер Л, дающий тонкий пространственно когерентный гауссов пучок света высокой степени монохроматичности с длиной волны $\lambda = 632,8$ нм. С помощью положительной микролинзы L_1 (микрообъектива) и длиннофокусной положительной линзы L_2 лазерный пучок расширяется до необходимых размеров. Линзы L_1 и L_2 образуют телескопическую систему, формирующую параллельный (коллимированный) лазерный пучок, который с помощью поворотного зеркала M_1 направляется на катетную грань прямоугольной призмы R, расположенной ребром вниз. Испытав незначительное (~4%) отражение от этой грани, лазерный пучок проникает внутрь призмы и попадает на гипотенузную грань под углом, несколько меньшим угла полного внутреннего отражения. Поэтому часть лазерных лучей проходит через гипотенузную грань призмы и освещает контролируемую деталь В. Отраженные от детали лучи вновь возвращаются в призму. Таким образом, на вторую катетную грань призмы падают и выходят из призмы уже два лазерных пучка - две световые волны: одна - отраженная гипотенузной гранью призмы, вторая - отраженная поверхностью детали.

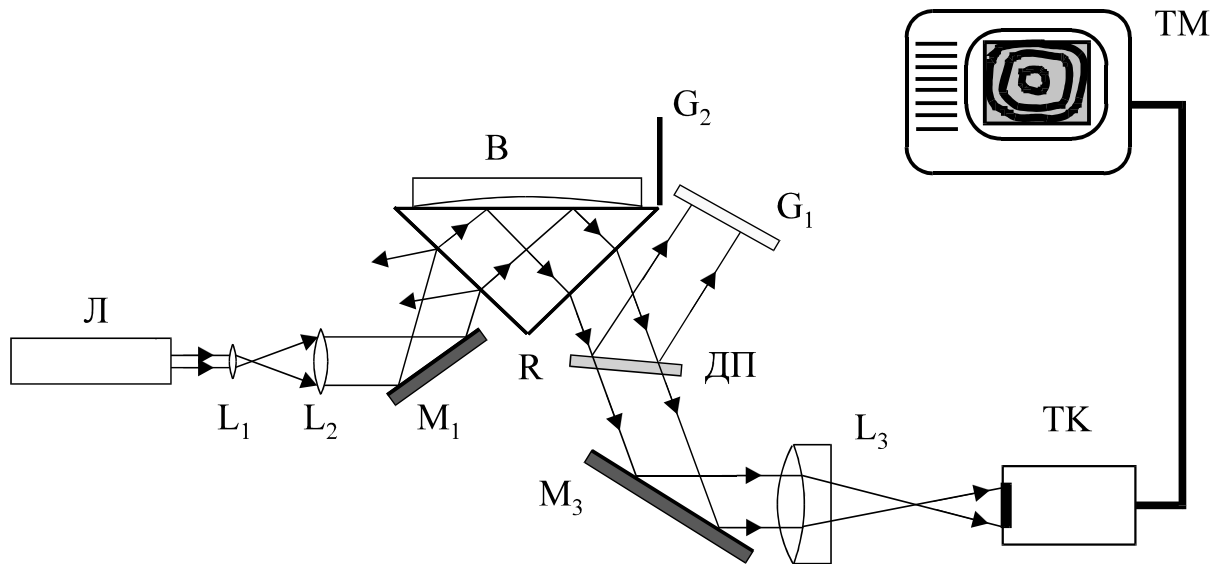


Рис.1. Оптическая схема лазерного призмного интерферометра с видеоконтрольным устройством.

Эти волны взаимно когерентны и, перекрываясь в пространстве, образуют интерференционную картину, наблюдаемую во всей области перекрытия. Делительная пластинка ДП с приблизительно 50% отражающим покрытием оба пучка света, вышедшие из призмы, направляет на матовое стекло G_1 , где наблюдается интерференционная картина. Непрозрачный экран G_2 служит для блокирования лазерных лучей, проходящих мимо объекта В.

В качестве дополнительного средства наблюдения интерференционной картины используется видеоконтрольное устройство, включающее телекамеру ТК и монитор ТМ. Пучки света, прошедшие через делительную пластинку ДП, зеркалом M_2 направляются на объектив L_3 , а затем на входное окно телекамеры ТК. На экране монитора ТМ формируется изображение объекта с интерференционными полосами.

Все элементы и блоки интерферометра с помощью рейтеров крепятся к рельсу малой оптической скамьи. Прямоугольная призма R в данном интерферометре служит для деления исходной световой волны на два пучка света и последующего их сведения, а также выполняет роль держателя контролируемой детали. Гипотенузная грань призмы является поверхностью сравнения - опорной поверхностью, поскольку отраженная от нее световая волна интерферирует с волной, отраженной от контролируемой детали. Форма интерференционных полос определяется различием в форме поверхностей, а число полос дает количественную характеристику этого различия. Гипотенузная грань призмы обработана с высокой точностью и является почти идеальной плоскостью, поэтому с помощью данного интерферометра можно определять профиль отклонения от плоскости (неплоскостность) тех или иных поверхностей.

Вывод рабочей формулы

Определим оптическую разность хода световых лучей в призмном интерферометре. Для этого проследим ход лучей в призме и воздушном зазоре между гипотенузной гранью и поверхностью контролируемой детали. Рассмотрим два произвольных луча - 1 и 2 (рис.2), падающих под углом i на катетную грань АВ и соответственно под углом β на гипотенузную грань ВС призмы. Луч 1 в точке К выходит из призмы под углом α , отражается в точке L от поверхности детали и возвращается в призму в точке М, где встречается с лучом 2. Далее лучи 1 и 2 распространяются совместно и выходят из призмы

через катетную грань AC. На волновой поверхности KE лучи 1 и 2 имеют одинаковые фазы, поэтому разность фаз световых волн в точке M будет определяться выражением

$$\Delta\varphi = \frac{2\pi}{\lambda} (KL + ML) + \pi - \frac{2\pi}{\lambda} n EM . \quad (1)$$

При выводе формулы (1) учтено, что показатель преломления призмы равен n , а показатель преломления воздушного зазора между призмой и деталью равен 1. Добавлением π учитывается тот факт, что при отражении света поверхностью детали - диэлектрика, оптически более плотной, чем воздух, происходит скачок фазы волны на π радиан.

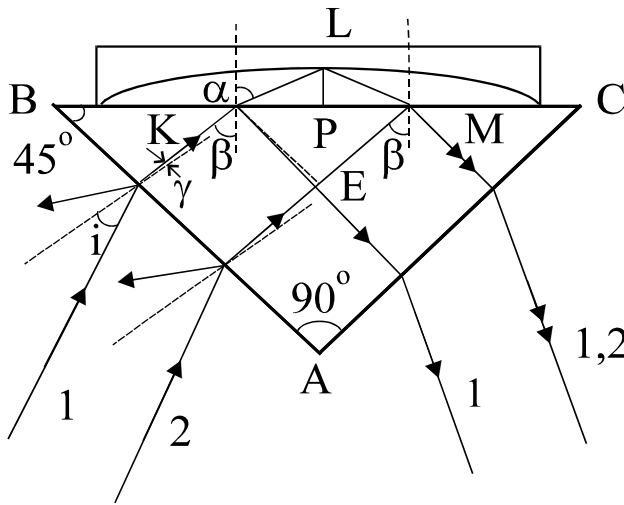


Рис.2. К расчету разности фаз световых волн в призмном интерферометре.

Обозначим расстояние LP через h ; из прямоугольных треугольников LPK, LPM и MEK видно, что $KL = LM = h/\cos\alpha$, а $EM = 2h \operatorname{tg}\alpha \sin\beta$. Подставляя эти выражения в уравнение (1) и используя закон преломления света $n = \sin\alpha/\sin\beta$, после элементарных преобразований получим:

$$\Delta\varphi = \frac{2\pi}{\lambda} 2h \cos\alpha + \pi . \quad (2)$$

Положение темных интерференционных полос определяется условием $\Delta\varphi = (2m+1)\pi$. Следовательно, при $h = 0$ будет наблюдаться темная интерференционная полоса и для h получаем выражение

$$h = \frac{m\lambda}{2\cos\alpha} , \quad (3)$$

где m - число наблюдаемых темных полос.

По формуле (3) при известных значениях m , α и λ можно определить неплоскостность h поверхности исследуемой пластинки. Наблюдаемые интерференционные полосы являются полосами равной толщины, поскольку каждая из них соответствует определенной толщине h воздушного зазора. В целом наблюдаемую интерференционную

картину можно интерпретировать как "топографическую" карту поверхности детали. Иными словами, интерференционные полосы представляют собой следы сечения поверхности пластины системой плоскостей, параллельных гипотенузной грани призмы и отстоящих на расстоянии Δh друг от друга, равном

$$\Delta h = \frac{\lambda}{2} \cos \alpha \cdot \quad (4)$$

Следует обратить внимание, что знак отклонения от плоскости по интерференционной картине не определяется однозначно. Например, при сферической форме поверхности возникает система концентрических колец (кольца Ньютона). По наблюдаемой картине полос неясно, выпуклой или вогнутой является поверхность детали. Для устранения этой неопределенности необходима дополнительная информация, которая может быть получена, например, путем изучения поведения интерференционной картины при небольшом наклоне контролируемой детали. На рис.3 схематически показан вид интерференционной картины в случае выпуклой (рис.3, а и б) и вогнутой (рис.3, в и г) поверхностей детали. Если детали лежат без наклона, то наблюдается одинаковая интерференционная картина для обеих деталей (рис.3, а и в).

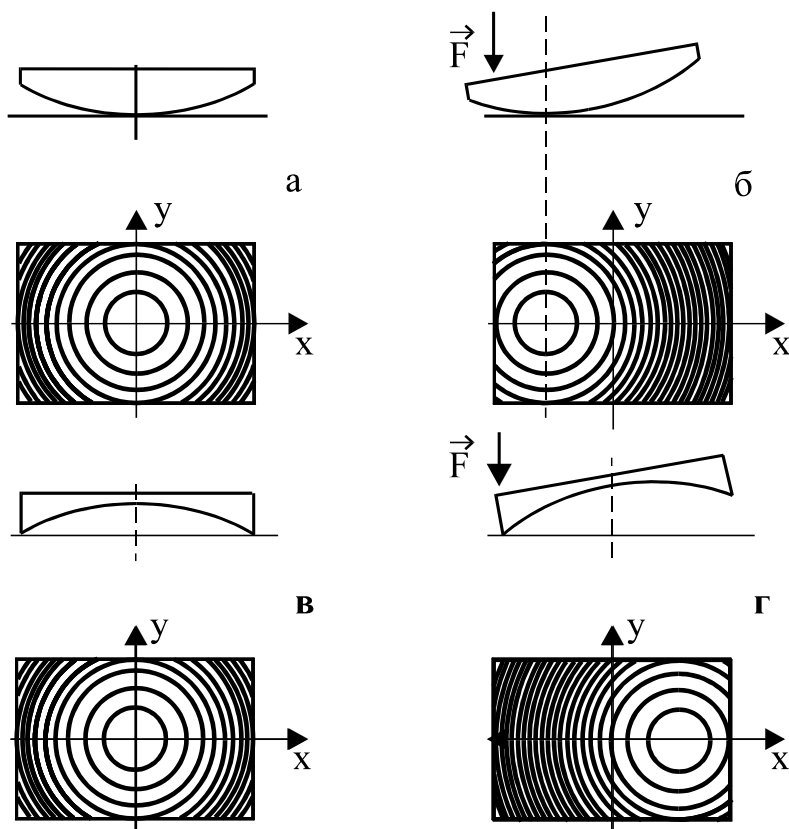


Рис.3. Схематичный вид интерференционных картин для объектов с выпуклой и вогнутой формами поверхности.

Если же деталь наклонить, например, легким нажатием на ее край (направление силы нажатия F на рис.3 показано стрелкой), то центр колец сместится в случае выпуклой поверхности к той стороне детали, на которую нажали, в случае вогнутой поверхности - в противоположную сторону (см. рис.3, б и г). Описанным способом можно отличить выпуклую поверхность от вогнутой.

Неплоскостность, то есть величину отклонения поверхности образца от плоскости, можно определить по формуле (3), измерив угол α и подсчитав число полос m от центра интерференционной картины до края пластины.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

Задание. Определить с помощью лазерного призмного интерферометра неплоскостность полированных пластин.

Приборы и принадлежности: лазерный интерферометр, состоящий из гелий-неонового лазера, телескопического расширителя лазерного пучка, призмного блока с поворотным зеркалом, прямоугольной стеклянной призмой и делительной полупрозрачной пластиной, матового стекла и второго поворотного зеркала на штативе, объектива, телекамеры и монитора; контролируемые пластинки; транспортир; картонный экран; непрозрачная заслонка; салфетка.

Порядок выполнения задания:

1. Включить лазер. Для этого подключить блок питания лазера к сети переменного напряжения 220 В и включить тумблер "сеть" на передней панели блока питания. Включить видеоконтрольное устройство, подключив монитор к сети 220 В и нажав кнопку "сеть" на верхней панели монитора.

2. Произвести юстировку оптической схемы интерферометра (рис.1):

а) юстировочными винтами держателей, в которые закреплены лазер L , линзы L_1 и L_2 , добиться равномерной освещенности на экране, установленном за телескопическим расширителем лазерного пучка;

б) установить непрозрачную заслонку Q так, чтобы она перекрывала нижнюю часть расширенного лазерного пучка (рис.4); открепив фиксирующие винты зеркала M_1 , и поворачивая его, направить край тени от заслонки в центр гипотенузной грани призмы; полупрозрачной делительной пластиной ДП вывести край тени в середину матового стекла G_1 ;

в) поворотом зеркала M_2 направить пучок света, прошедший через делительную пластинку ДП, параллельно рельсу на объектив L_3 , который следует установить так, чтобы край тени от заслонки Q попадал в центр апертуры объектива и в центр входного окна телекамеры ТК.

г) измерить угол α выхода лазерных лучей, установив транспортир на гипотенузную грань призмы так, чтобы край тени от заслонки прочерчивал линию на его поверхности;

д) убрать транспортир и заслонку.

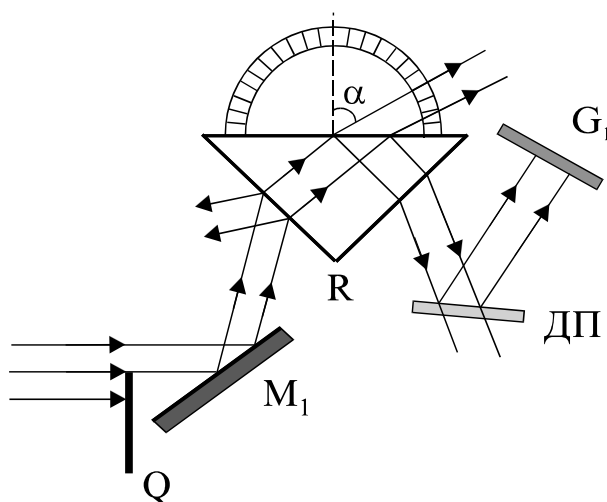


Рис.4. Схема измерения угла α выхода лазерного пучка через гипотенузную грань призмы.

3. Протереть салфеткой гипотенузную грань призмы и полированные поверхности исследуемых пластинок.

4. Определить профиль отклонения от плоскости поверхности пластинок:

а) положить одну из пластинок на гипотенузную грань призмы полированной поверхностью вниз, при этом на матовом стекле G_1 интерферометра и экране монитора ТМ должна появиться интерференционная картина; легким нажатием на пластинку добиться наиболее симметричного вида интерференционной картины; если картина отсутствует, что может быть связано с попаданием между поверхностями пластины и призмы пылинок и

образованием слишком большого зазора, пластинку следует снять и тщательно протереть ее и гипотенузную грань призмы салфеткой еще раз;

б) перемещением держателей (рейтеров) объектива L_3 или телекамеры ТК вдоль рельса отрегулировать масштаб изображения интерференционной картины на экране монитора;

в) по виду интерференционной картины установить форму контролируемой поверхности: легким нажатием поочередно на две смежные стороны пластинки определить знак прогиба поверхности вдоль ортогональных направлений x и y ;

г) подсчитать число темных полос в интерференционной картине по обе стороны от центра по оси x : m_{x1} , m_{x2} и по оси y : m_{y1} , m_{y2} ; полученные данные занести в таблицу:

Т а б л и ц а

Номер плас- тинки	α	m_{x1}	m_{x2}	\bar{m}_x	m_{y1}	m_{y2}	\bar{m}_y	h_x	h_y

д) наложить на матовое стекло листок тонкой бумаги (при этом через нее будет просвечиваться интерференционная картина) и скопировать рисунок полос вместе с контуром пластинки.

5. Вычислить средние значения чисел полос \bar{m}_x и \bar{m}_y вдоль двух взаимно перпендикулярных направлений x и y , проходящих через центр картины интерференционных полос.

6. Используя рабочую формулу (3), определить значение неплоскостности h_x и h_y в направлениях x и y для каждой пластинки. В соответствии с результатами эксперимента присвоить значениям h_x и h_y знак "+", если поверхность выпуклая, или "-", для вогнутой поверхности.

Контрольные вопросы и задания

1. Как устроен лазерный призмный интерферометр?
2. Какого типа интерференционные полосы (равной толщины или равного наклона) формируются в призмном интерферометре?
3. Записать выражение для распределения интенсивности света I в интерференционной картине в зависимости от разности фаз $\Delta\varphi$ и пояснить, как с ее помощью можно определить форму контролируемой поверхности.
4. Получить выражения для разности хода лучей в интерферометре и “цены” одной интерференционной полосы.
5. Как с помощью данного интерферометра можно определить величину и знак прогиба полированных пластин?
6. Почему попадание пылинок между поверхностями призмы и исследуемой пластины может привести к исчезновению наблюдаемых интерференционных полос?
7. Какие требования к временной и пространственной когерентности лазерного излучения должны выполняться в данном интерферометре?