

А. М. БУРБАЕВ, В. В. ЗЮЗИН, М. Г. ЛУКИН, С. А. МАРУСОВ, В. И. МИЩЕНКО

## ПРИМЕНЕНИЕ ДИСПЕРСИОННОГО ЭЛЕМЕНТА ПРИ НАСТРОЙКЕ ИНТЕРФЕРОМЕТРОВ ТИПА ЦЕНДЕРА — МАХА

Изложены принципы спектральной интерферометрии, рассмотрен механизм формирования муаровых полос при введении дисперсионного элемента на выходе интерферометра. Показано, как использование предлагаемого метода позволяет расширить динамический диапазон регистрации интерференционных полос при поиске нулевой разности хода, а также упростить и ускорить процесс настройки интерферометра на нулевую разность хода интерферирующих пучков.

**Ключевые слова:** принципы спектральной интерферометрии, интерферометр Цендера — Маха, муаровые полосы, волновой цуг, длина когерентности.

**Введение.** Интерференционные методы измерений и исследований находят широкое применение в науке и технике благодаря высокой чувствительности и точности. Интерферометры используются для точных измерений длин и углов, угловых размеров звезд, характеристик оптических поверхностей, показателей преломления сред, спектрального состава исследуемого излучения [1].

Наибольшее распространение получили интерферометры, работающие по принципу двухлучевой интерференции. К классическим интерферометрам этой группы относятся интерферометры Майкельсона, Тваймана — Грина, Жамена, Цендера — Маха и Рождественского.

Предложенный почти одновременно (в 1891 и 1892 гг.) и независимо друг от друга Цендером и Махом интерферометр, принципиальная схема которого приведена на рис.1, обладает рядом преимуществ по сравнению с интерферометрами Майкельсона и Жамена. Прежде всего, это возможность получения контрастной и хорошо освещенной интерференционной картины (с полосами заданной ширины) в плоскости объекта, установленного на произвольном расстоянии от зеркал интерферометра [2]. Данное обстоятельство обусловило возможность использования интерферометра Цендера — Маха для измерения показателей преломления газов, для исследования неоднородностей воздушного потока в аэродинамической трубе, для изучения распределения плотностей газовых потоков вокруг моделей, исследуемых в аэродинамических установках, для изучения температурного поля объекта, для измерения напряжений в моделях при наличии статических и динамических нагрузок [3].

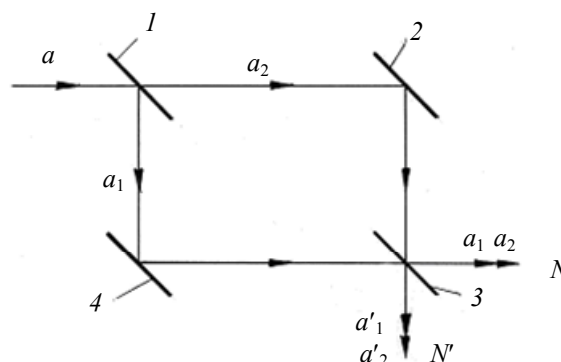


Рис. 1

Однако воспользоваться перечисленными возможностями интерферометра Цендера — Маха можно лишь при условии его юстировки. Основные вопросы, связанные с устройством и юстировкой интерферометров, изложены в трудах наших соотечественников — акад. Д. С. Рождественского [4] и проф. А. Н. Захарьевского [5]. Методика юстировки больших четырехзеркальных двухлучевых интерферометров и, в особенности, интерферометра Цендера — Маха подробно разработана канд. техн. наук А. А. Забелиным в его диссертации [6] и внедрена им на производстве.

В соответствии с этой методикой при юстировке интерферометра Цендера — Маха предусмотрено выполнение трех последовательных этапов:

- 1) предварительная установка элементов интерферометра — грубая, на глаз, без использования каких-либо приспособлений;
- 2) геометрическая юстировка — точная, с помощью вспомогательной зрительной трубы с линзовой насадкой;
- 3) окончательная юстировка — без использования приспособлений, на глаз, но с контролем результатов по наблюдаемой интерференционной картине в монохроматическом свете.

Именно этот, последний, этап юстировки, даже при четком следовании рекомендациям автора методики, представляется операцией сложной и трудоемкой, требующей, кроме глубокого понимания физики явления, непрерывного внимания и некоторых профессиональных навыков.

Напомним, что в результате выполнения первых двух этапов юстировки отклонения соответствующих лучей и соответственных точек на выходе интерферометра характеризуются следующими параметрами:

- а) угол  $\alpha$  между интерферирующими лучами  $a_1$  и  $a_2$  (см. рис. 1) меньше  $10''$ ;
- б) сдвиг этих лучей в поперечном направлении менее  $0,1$  мм;
- в) разность хода  $\delta$  — неравенство путей, пройденных лучами в двух ветвях интерферометра от точки разделения лучей до определенной точки поля, — меньше  $1$  мм.

Только в этом случае можно наблюдать интерференционные полосы в монохроматическом свете. Далее, опытный юстировщик, учитывая вид интерференционной картины, посредством грубой подвижки, например, зеркала 4 (см. рис. 1) вдоль его нормали предпринимает попытку существенно уменьшить разность хода в целях достижения достаточно четких и прямых интерференционных полос в монохроматическом свете. Заметим, что для наблюдения широких интерференционных полос в белом свете остаточные отклонения  $t$ ,  $\Delta$  и  $\alpha$  должны быть близки к нулю, при этом параметры  $t$  и  $\Delta$  не должны превышать нескольких долей микрометра, а  $\alpha$  — нескольких долей угловой секунды.

Сложность этого этапа юстировки состоит еще и в том, что при изменении параметра  $\Delta$  за счет тонкого поступательного перемещения пластины 1 (см. рис. 1) с помощью механизма дифференциального винта изменяются и параметры  $\alpha$  и  $t$ . Это объясняется тем, что угол падения луча на пластину составляет примерно  $45^\circ$ , а направляющие, по которым перемещается пластина, не являются идеальными с точки зрения прямолинейности и отсутствия зазоров. Вследствие этого контрастность интерференционной картины ухудшается, а ширина полос становится исчезающе малой или, наоборот, соизмеримой с размером поля.

Для облегчения и ускорения процесса окончательной настройки интерферометра предлагается на его выходе использовать дисперсионный элемент. Еще в 1845 г. французские физики Фуко и Физо провели исследование [7], которое заключалось в наблюдении интерференции света при большой разности хода, при этом они впервые использовали дисперсионный элемент на выходе интерферометра.

**Механизм формирования муаровых полос при некогерентном сложении монохроматических картин.** Обычно при интерпретации интерференционных опытов предполагается, что источник излучает монохроматический свет. Вполне очевидно, что результаты, полу-

ченные для монохроматической идеализации, имеют ограниченное применение. Реальные природные широкополосные, например звездные, источники света в каждом из спектральных компонентов излучают хаотическую последовательность более или менее длинных волновых цугов. Поэтому можно рассматривать реальное излучение как совокупность большого числа монохроматических компонентов (теорема Фурье), имеющих разные частоты.

Пусть свет от источника, используемого в интерференционном эксперименте, разлагается с помощью какого-либо спектрального прибора (призма, дифракционная решетка) на множество монохроматических пучков. Поскольку процесс собственно излучения не является периодическим, в результате формируется „сплошной“ спектр, т.е. набор монохроматических компонентов, частоты которых непрерывно заполняют некоторый спектральный диапазон. Каждая спектральная линия первичного источника создает свою интерференционную картину, распределение интенсивности в которой описывается формулой

$$I(\Delta) = 2I_0 (1 + \cos(k\Delta)),$$

где  $k = \omega/c$  — волновое число;  $I_0$  — равномерная интенсивность волны, которую может создавать только один вторичный источник;  $\Delta$  — разность хода двух интерферирующих волн от вторичных источников до точки наблюдения.

Закон аддитивного сложения интенсивностей спектральных компонентов в интервале волновых чисел  $(k, k + dk)$  определяется как

$$I(\Delta) = 2 \int I_1(k)(1 + \cos(k\Delta))dk,$$

где  $I_1(k)$  — спектральное распределение интенсивности источника,  $I_1(k)dk$  — интенсивность одного из интерферирующих пучков в интервале волновых чисел  $(k, k + dk)$ .

Для любого источника, занимающего спектральный диапазон  $\delta k$ , длину когерентности  $\ell = 2\pi/\delta k$  всегда можно принять за некоторую *эффективную* протяженность волновых цугов. При таком подходе две возможные интерпретации исчезновения интерференционных полос при больших разностях хода — в рамках представлений о хаотической последовательности волновых цугов конечной протяженности или о наложении интерференционных картин, создаваемых отдельными монохроматическими компонентами в спектре излучения, — оказываются эквивалентными [8].

Введение разности хода между интерферирующими пучками эквивалентно задержке одного из них во времени, поэтому способность световых колебаний в одной точке исходного пучка к интерференции после его разделения на два пучка и последующего их соединения при некоторой разности хода называется *временной когерентностью*. Максимальная разность хода, при которой возможна интерференция, называется *длиной когерентности излучения*  $\ell$ , а соответствующее ей запаздывание — *временем когерентности*  $\tau = \ell/c$ .

Условие временной когерентности световых колебаний можно записать в виде

$$\Delta < \ell = c\tau.$$

Уменьшение когерентности световых колебаний с увеличением временной задержки, т.е. уменьшение различимости интерференционных полос при возрастании разности хода связано с конечной шириной спектральной линии источника квазимонохроматического света. Такое излучение можно рассматривать как совокупность не скоррелированных между собой отдельных монохроматических волн, частоты которых заполняют некоторый интервал  $\delta\omega$ , малый по сравнению со средней частотой  $\omega$ . Каждая монохроматическая волна из этой совокупности создает в интерферометре свою картину полос, и полное распределение освещенности определяется простым наложением этих картин.

При малых разностях хода интерферирующих лучей (порядка нескольких длин волн) положение полос в картинах, создаваемых отдельными монохроматическими составляющими,

практически одинаково. Поэтому полосы суммарной картины отчетливы. По мере увеличения разности хода отдельные монохроматические картины полос смещаются одна относительно другой из-за различия длин волн, и в результате суммарная картина оказывается полностью размытой.

Оценить разность хода, при которой происходит исчезновение полос, можно следующим образом. Примем, что отдельные монохроматические компоненты *равномерно* заполняют спектральный интервал шириной  $\delta\omega$  („прямоугольный“ спектральный контур линии). Разделим мысленно этот интервал на множество пар бесконечно узких спектральных линий, отстоящих по частоте на  $\delta\omega/2$ , т.е. на  $\delta k/2$  по шкале волновых чисел ( $k = \omega/c$ ). Распределение освещенности, формируемое каждой парой, определяется формулой

$$I(\Delta) = 4I_0 [1 + \cos(\delta k \Delta/2) \cos(k\Delta)], \quad (1)$$

в которой  $\delta k$  (расстояние между монохроматическими компонентами) следует теперь заменить на  $\delta k/2$ . Полосы в этой картине пропадают при такой разности хода  $\Delta_{\max} = \ell$ , при которой аргумент первого косинуса в формуле (1) становится равным  $\pi/2$ . Заменяя  $\delta k$  на  $\delta k/2$ , находим

$$\ell = 2\pi/\delta k = \lambda^2/\delta\lambda. \quad (2)$$

Условие исчезновения полос для всех пар монохроматических компонентов, на которые был разделен спектральный интервал  $\delta\omega$ , одинаково. Поэтому при разности хода  $\Delta = \ell$  полосы интерференционной картины размываются.

Формулу (2) можно использовать для оценки длины когерентности и в случае более сложной формы контура спектральной линии квазимонохроматического света, понимая под  $\delta k$  (или  $\delta\lambda$ ) полуширину контура (т.е. ширину на половине высоты). Длине когерентности соответствует максимально возможный порядок интерференции  $m_{\max} = \lambda/\delta\lambda = \omega/\Delta\omega$ , которого можно достичь в квазимонохроматическом свете со спектральной шириной  $\delta\omega$  (или  $\delta\lambda$ ).

Для белого света (солнце, лампа накаливания) и визуального наблюдения эффективный диапазон длин волн  $\delta\lambda$  простирается приблизительно от 400 до 700 нм, т.е.  $\delta\lambda \sim \lambda$ . В этом случае  $m_{\max} \sim 1$  и интерференционные полосы, казалось бы, наблюдаться не должны. Действительно, приемник излучения, обладающий примерно одинаковой чувствительностью на различных участках спектра, например термоэлемент, покажет при перемещении в поле зрения поперек полос почти равномерное распределение освещенности. Однако глаз человека представляет собой селективный приемник с сильно изменяющейся чувствительностью в зависимости от длины волны, что обуславливает преимущество некоторых длин волн.

Визуальное наблюдение полос в белом свете облегчается и благодаря способности зрения различать цвет, а не только интенсивность света. Поэтому в белом свете глаз различает около десятка окрашенных интерференционных полос. При равной нулю разности хода, т.е. в тех областях, куда две интерферирующие волны приходят в одинаковых фазах, условие максимума выполняется для всех длин волн. В этой области формируется ахроматическая (т.е. неокрашенная) светлая полоса. По обе стороны от нее находятся окрашенные максимумы и минимумы, цвета которых постепенно тускнеют по мере удаления от полосы нулевого порядка, а еще дальше поле зрения воспринимается глазом как равномерно освещенное белым светом. Таково происхождение красивых интерференционных цветов в тонких пленках масла или бензина на поверхности воды.

Картина интерференционных полос в белом свете иногда может оказаться полезной при интерферометрических измерениях, так как с ее помощью можно легко обнаружить для монохроматического света полосу нулевого порядка, соответствующую равной нулю разности хода. Для этого достаточно временно заменить монохроматический источник источником белого света при неизменном расположении остальных оптических элементов. Благодаря уникальному свойству картины интерференции в белом свете его можно использовать для

устранения неопределенности в метрологических системах фазирования составных зеркал адаптивных астрономических телескопов и в линиях задержки звездных интерферометров при определении нулевой разности хода интерферирующих пучков.

**Результаты экспериментального исследования.** Проверка эффективности и простоты настройки интерферометра с использованием дисперсионного элемента выполнялась на макете интерферометра Цендера — Маха, установленном в Лаборатории сборки и юстировки оптико-электронных приборов кафедры компьютеризации и проектирования оптических приборов СПбГУ ИТМО. В качестве диспергирующих элементов использовались отражательная и прозрачная дифракционные решетки с частотой штрихов соответственно 300 и 100 на 1 мм. Место установки дифракционной решетки определялось удобством осуществления юстировочных подвижек при одновременном наблюдении за изменяющейся картиной как в направлении  $N$ , так и в направлении  $N'$  (см. рис. 1).

В качестве источника света был выбран штатный коллиматор, в фокальной плоскости которого установлена низковольтная лампа накаливания. Дифракционная решетка преобразует в спектр изображение спирали, фактически — в горизонтальную полосу.

Следует подчеркнуть, что использование дисперсионного элемента при настройке интерферометра не исключает выполнения первых двух этапов его юстировки. Более того, разность хода в интерферирующих пучках должна быть сведена к минимуму, определяемому спектральным разрешением применяемого элемента. Чем выше разрешение, тем большая разность хода может быть допущена. При использовании в эксперименте отражательной решетки уже при разности хода в ветвях примерно 0,5 мм удалось на пределе разрешения для глаза зарегистрировать муаровые полосы в одном из порядков спектра, расположенном вблизи максимума излучения.

За счет перемещения пластины  $I$  (см. рис. 1) осуществлялось уменьшение разности хода в ветвях интерферометра. При этом уменьшалась и частота муаровых полос. Характер изменения частоты муаровых полос по мере уменьшения разности хода в ветвях интерферометра иллюстрируется фотоизображениями картин, приведенными на рис. 2.

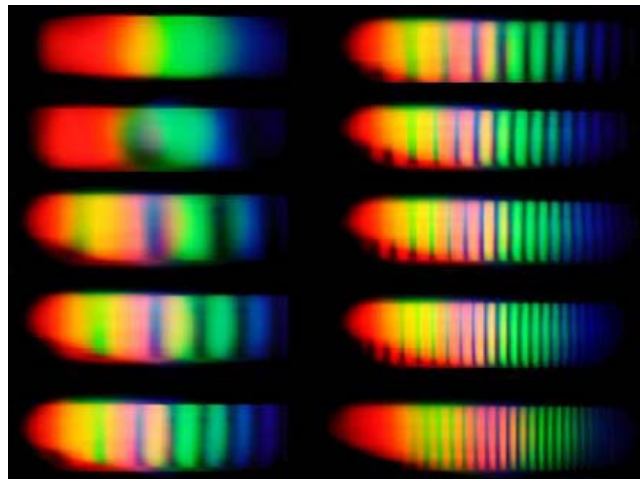


Рис. 2

При юстировке следовало сохранять контрастность полос и перпендикулярность их спектральной оси, положение которой определяется положением дифракционной решетки. Для этой цели, как и в исходной методике [6], осуществлялись угловые подвижки светоделительных пластин  $I$  и  $3$  (см. рис. 1). При достижении 2—3 полос, при выводе решетки из хода лучей, на выходе интерферометра можно было наблюдать интерференционные полосы белого света с ахроматической белой полосой, соответствующей нулевой разности хода.

Следует заметить, что при переходе к более высокому порядку спектра разрешение полос при одной и той же разности хода возрастает. Интересно также отметить еще одно свойство муаровых полос. Если в процессе юстировки контрастность муаровых полос или их вертикальное расположение сохранить не удастся, увидеть интерференцию в белом свете все-таки возможно. При этом полосы оказываются узкими и малоконтрастными. Как и при традиционной юстировке, в данном случае интерференционная картина наблюдается на установленном за пластиной  $l$  белом экране, хорошо освещенном, например, с помощью осветителя ОИ-19.

Для сравнения предлагаемой в настоящей статье методики настройки интерферометра с применяемой в настоящее время [6] (в процессе выполнения лабораторной работы студентами) можно привести следующие цифры. Для преодоления разности хода  $\Delta = 0,5$  мм в ветвях интерферометра потребуется более 300 шаговых перемещений пластины  $l$  с помощью маховичка привода механизма дифференциального винта. При каждом шаге пластина перемещается примерно на 1 мкм. После каждого шага необходимо отпустить маховичок, чтобы исключить всякое усилие и вибрацию, оказываемые на столик с закрепленной на нем пластиной интерферометра. В противном случае появление интерференционной картины в белом свете можно просто не заметить. При этом, как отмечалось выше, необходимо постоянно корректировать положение элементов интерферометра, чтобы не потерять из виду интерференционные полосы в монохроматическом свете.

**Заключение.** При использовании спектрального элемента на выходе интерферометра происходит разложение света на спектральные компоненты в обоих его пучках. При таком сочетании интерферометра со спектрометром возникает особый вид картины спектра, пересеченного темными полосами. По сути, происходит некогерентное сложение периодических распределений интенсивности в монохроматических картинах, приводящее к появлению суммарного муарового эффекта. В результате эффективность поиска интерференционной картины в белом свете с дифракционной решеткой повышается за счет увеличения динамического диапазона регистрации муаровых полос. Применение предложенной методики позволяет значительно упростить и ускорить процесс настройки интерферометра Цендера — Маха.

В исследованиях, результаты которых представлены в настоящей статье, активное непосредственное участие принимал А. Г. Серегин.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Стафеев С. К., Боярский К. К., Башина Г. Л. Основы оптики: Учеб. пособие. СПб: Питер, 2006. 336 с.
2. Коломийцов Ю. В. Интерферометры. Основы инженерной теории, применение. Л.: Машиностроение, 1976. 296 с.
3. Нагибина И. М. Интерференция и дифракция света. Учеб. пособие для вузов. Л.: Машиностроение, 1974. 360 с.
4. Рождественский Д. С. Работа по аномальной дисперсии в парах металлов. М.: Изд-во АН СССР, 1961.
5. Захарьевский А. Н. Интерферометры. М.: Оборонгиз, 1952. 296 с.
6. Забелин А. А. Методика юстировки больших зеркальных интерферометров типа Цендера: Автореф. дис. ... канд. техн. наук. Л.: ГОИ им. С. И. Вавилова, 1957.
7. Fizeau H., Foucault L. Sur le phenomene des interferences entre deux rayons de lumiere dans le cas de grandes differences de marche // C.R. Del L'academie des sciences. 1845. Vol. 21. P. 1155—1158.
8. Бутиков Е. И. Оптика. СПб: Невский диалект, 2003. 480 с.

#### Сведения об авторах

**Амир Маруанович Бурбаев**

— доцент; Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, кафедра компьютеризации и проектирования оптических приборов;  
E-mail: aburbaev@mail.ru

- Вадим Васильевич Зюзин** — студент; Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, кафедра компьютеризации и проектирования оптических приборов
- Максим Геннадьевич Лукин** — студент; Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, кафедра компьютеризации и проектирования оптических приборов
- Сергей Александрович Марусов** — студент; Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, кафедра компьютеризации и проектирования оптических приборов
- Владимир Иванович Мищенко** — студент; Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, кафедра компьютеризации и проектирования оптических приборов

Рекомендована кафедрой  
компьютеризации и проектирования  
оптических приборов

Поступила в редакцию  
26.04.11 г.