

А К А Д Е М И Я Н А У К С С С Р
 С И Б И Р С К О Е О Т Д Е Л Е Н И Е
 А В Т О М Е Т Р И Я
 Л а з е р н ы е и з м е р и т е л ь н ы е у с т р о й с т в а

УДК 531.715.1 : 621.375.826

В. П. КОРОНКЕВИЧ, Г. А. ЛЕНКОВА
 (Новосибирск)

ЛАЗЕРНЫЙ ИНТЕРФЕРОМЕТР ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ ДЛИНЫ

Современный прибор для интерференционных измерений длины состоит из двух основных элементов — интерферометра и электронной системы для счета интерференционных полос и обработки результата измерения. Интерферометр преобразует исходное когерентное излучение в периодическую последовательность изменений электрического сигнала, а выходная электронная система вычисляет величину перемещения по числу прошедших интерференционных полос и результатам предварительного определения длины волны.

Анализ интерференционных схем современных лазерных интерферометров показывает, что в практике измерений длины утвердился двухлучевой интерферометр майкельсоновского типа, подвижный элемент которого жестко связан с измеряемым объектом. Для исключения влияния погрешностей направляющих на параметры интерференционного поля подвижное зеркало выполняется в виде уголкового отражателя. Оптиче-

ская развязка резонатора лазера и интерферометра осуществляется стандартными поляризационными элементами или путем разнесения мест деления и рекомбинации интерферирующих пучков. Чувствительность к направлению движения почти у всех приборов достигается построением схем с двумя интерференционными картинками на выходе, сдвинутыми относительно друг друга на четверть полосы.

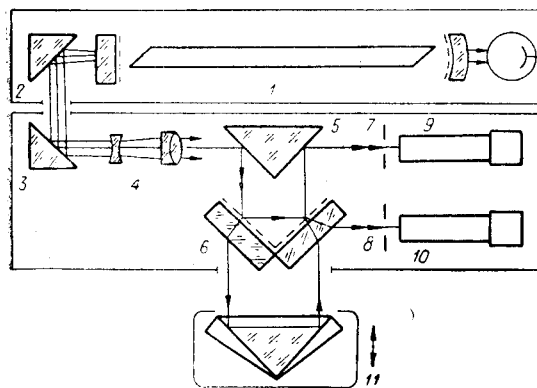


Рис. 1. Оптическая схема интерферометра.

Ниже представлены результаты исследования лазерного интерферометра Ин-

ститута автоматики и электрометрии СО АН СССР и приведены расчетные данные, положенные в основу прибора.

Оптическая схема интерферометра (рис. 1) состоит из двух прямоугольных и одного тройного блоков, ребра которых располагаются в одной плоскости. В осветительную систему интерферометра входит малогаба-

ритный гелий-неоновый лазер 1, стабилизированный по провалу Лэмба [1, 2], прямоугольные призмы 2, 3 для излома оптической оси и перевернутая зрительная труба 4 для уменьшения расходимости лазерного пучка. Объектив этой трубы играет роль входного коллиматора. Прямоугольная призма 5 с двумя отражающими поверхностями введена по двум причинам. При юстировке интерферометра она позволяет установить направление визирной оси интерферометра относительно базовых деталей корпуса и облегчает конструирование фотоэлектрического блока, направляя второй интерференционный канал параллельно первому.

Разделяющий блок 6 состоит из двух плоскопараллельных пластин, расположенных под углом 90° . На внутренние поверхности пластин нанесены диэлектрические светоделительные покрытия. На первой пластине происходит деление пучка, на второй — рекомбинация. В пространстве между блоком и фотоприемниками 9 и 10 образуется интерференционное поле. Перед фотоприемниками установлены юстируемые диафрагмы 7 и 8, смещенные относительно соответственных точек полей на четверть полосы.

Предлагаемая схема удобна тем, что после отражения в тройной призме пучки не возвращаются обратно к источнику. Тем самым исключается влияние вредных автоколлимационных бликов на излучение лазера. Собственно интерферометр имеет минимальное число оптических деталей и фактически состоит из двух полупрозрачных пластин и уголкового призмы.

При измерении интерферометр с лазером устанавливается на неподвижном основании. Призма 11 связывается с объектом, перемещение которого необходимо определить. При движении призмы вдоль визирной оси изменяется разность хода интерферирующих пучков. Полосы смещаются относительно неподвижных диафрагм 7 и 8. Фотоимпульсы, возникающие при прохождении полос, преобразуются и поступают в электронную систему.

Величина перемещения L связана с числом импульсов N следующим соотношением:

$$L = N\lambda/2, \quad (1)$$

где λ — длина волны источника излучения. Известно, что λ зависит от показателя преломления среды (воздуха):

$$\lambda = \frac{\lambda_{\text{вак}}}{n}, \quad (2)$$

где $\lambda_{\text{вак}}$ — длина волны в вакууме; n — показатель преломления воздуха. Длина волны лазера определяется путем сравнения ее с первичной нормалью — оранжевой линией изотопа криптона 86 [3]. Наиболее достоверным значением длины волны в вакууме гелий-неонового лазера, стабилизированного по провалу Лэмба, следует считать средний результат, полученный в [4] и равный $\lambda_{\text{вак}} = 0,63299140 \cdot 10^{-6}$ м.

Для определения длины в соответствии с (1) и (2) необходимо знать величину n . Показатель преломления воздуха можно заранее вычислить [5], если известны параметры воздуха, в котором производятся измерения. Достаточно знать температуру (t), давление (p) и влажность (e). Другие факторы, такие, как например, содержание углекислоты, не принимаются во внимание из-за малого влияния на результат. Тогда

$$(n_{t,p,e} - 1) \cdot 10^8 = \frac{(n_s - 1) \cdot 0,00138823 p}{1 + 0,003671 t} - \left(5,722 - \frac{0,0457}{\lambda_{\text{вак}}^2} \right) e. \quad (3)$$

Здесь $(n_c - 1)$ — рефракция стандартного воздуха (сухой воздух при $t=15^\circ\text{C}$ и $p=760$ мм рт. ст.), определяемая по дисперсионной формуле Эдлена [5]

$$(n_c - 1) \cdot 10^6 = 272,599 + \frac{1,5358}{\lambda_{\text{вак}}^2} + \frac{0,01318}{\lambda_{\text{вак}}^4} \quad (4)$$

Из (2)—(4) были вычислены показатель преломления стандартного n_c и нормального n_n ($t=20^\circ\text{C}$; $p=760$ мм рт. ст.; $e=10$ мм рт. ст.) воздуха и длина волны при нормальных условиях λ_n гелий-неонового лазера для центра провала Лэмба:

$$n_c = 1,000276516; n_n = 1,000271226; \lambda_n = 0,63281976 \cdot 10^{-6} \text{ м.}$$

При измерениях с относительной точностью до $1 \cdot 10^{-7}$, удовлетворяющей современным требованиям, достаточно знать длину волны и показатель преломления с такой же точностью. Это позволяет не производить каждый раз вычислений действительной длины волны по формулам (2)—(4). Значительно проще ввести в электронную систему длину волны для нормальных условий и по мере изменения последних поправку на отступление от них.

Для определения поправочных коэффициентов продифференцируем (3) и представим его в виде

$$(n_{t,p,e} - n_n) = a(t - 20) + b(p - 760) + c(e - 10), \quad (5)$$

$$\text{где } a = \frac{-(n_c - 1) 0,00138823 p}{(1 + 0,003671 t)^2} \cdot 10^{-8}; \quad b = \frac{(n_c - 1) 0,00138823}{1 + 0,003671 t} \cdot 10^{-8};$$

$$c = -(5,722 - 0,0457/t^2) \cdot 10^{-8}.$$

Изменения коэффициентов a , b и c в зависимости от условий, если последние близки к нормальным, незначительны (см. таблицу).

Условия измерений	a	b	c
$t=(20 \pm 5)^\circ\text{C}$	$\pm 3 \cdot 10^{-8}/^\circ\text{C}$	$\mp 6 \cdot 10^{-9}/^\circ\text{C}$	0
$p=(760 \pm 30)$ мм рт. ст.	$\mp 3 \cdot 10^{-8}/\text{мм рт. ст.}$	0	0

В пределах, указанных в таблице, a , b и c можно считать постоянными и равными их значению при нормальных условиях. Ниже приводятся рассчитанные значения этих коэффициентов:

$$a = -92,9 \cdot 10^{-8}/^\circ\text{C}; \quad b = +35,8 \cdot 10^{-8}/\text{мм рт. ст.}; \quad c = -5,6 \cdot 10^{-8}/\text{мм рт. ст.}$$

Таким образом, для определения отклонения показателя преломления воздуха от нормального получена зависимость (коэффициенты округлены до $1 \cdot 10^{-8}$)

$$\Delta n = (n_{t,p,e} - n_n) = [-93(t - 20) + 36(p - 760) - 6(e - 10)] \cdot 10^{-8}. \quad (6)$$

Исходя из последнего соотношения и формул (2), (3), можно найти выражение для определения отклонения длины волны от нормальной:

$$\Delta \lambda = (\lambda_{t,p,e} - \lambda_n) = [+59(t - 20) - 23(p - 760) + 4(e - 10)] \cdot 10^{-8}. \quad (7)$$

Следует заметить, что окончательный вид формулы (7) для ввода поправок на окружающие условия зависит от способа счета полос и перевода их в метрические единицы.

В разработанном лазерном интерферометре применялся итерационный метод перевода числа импульсов в метрические единицы [6]. Сущность метода заключается в том, что каждому импульсу, равнозначному $\lambda/8$, приписывается значение длины в 0,1 мкм. В этом случае количество импульсов будет численно равно величине перемещения в микрометрах. Приращение, получаемое из-за несоответствия действительного значения импульса выбранному, исключается путем добавления или вычитания единицы через подходящее число импульсов. Такие операции производятся для первой ступени итерации через 3 импульса, для второй — через 19, для третьей — через 1232. Следует заметить, что первые два коэффициента c_1 и c_2 постоянны, а третий зависит от атмосферных условий. Коэффициент $c_3=1232$ соответствует нормальным условиям.

В отличие от [6] в нашем интерферометре поправка на отклонение условий от нормальных вводилась не в коэффициент третьей ступени, а в число, показывающее, через сколько циклов необходимо прибавить или отнять дополнительный импульс. Это число c_4 находилось по специальной линейке поправок после измерения температуры, давления и влажности окружающего воздуха.

Определим зависимость коэффициента c_4 от относительного изменения длины волны. Для этого воспользуемся выражением для c_3 из [6]:

$$c_3 = \frac{72 \lambda/8}{5,7 - 72 \lambda/8}. \quad (8)$$

Дифференцируя (8), находим

$$c_4 = \frac{c_3}{\Delta c_3} = \frac{1}{\frac{\Delta \lambda}{\lambda} c_3}. \quad (9)$$

Для упрощения электронной системы счета выбиралось $c_3=1234$, что соответствовало начальным условиям, отличным от нормальных ($t=22^\circ\text{C}$; $p=760$ мм рт. ст.; $e=10$ мм рт. ст.). Тогда с учетом (7) получим коррекционную формулу для $1/c_4$:

$$\frac{\Delta \lambda}{\lambda} \cdot 1234 = [+1144(t - 20) - 441(p - 760) + 69(e - 10)] \cdot 10^{-6}. \quad (10)$$

Это соотношение было положено в основу построения линейки поправок (рис. 2), пользуясь которой можно было вводить в шифратор электрон-

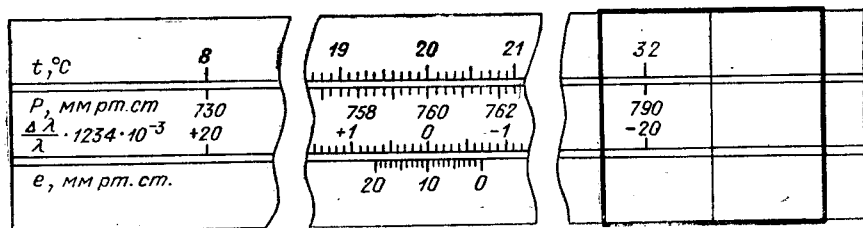


Рис. 2. Линейка для введения поправок на атмосферные условия.

ной системы [7] действительное значение длины волны для условий наблюдения. Линейка выполнена аналогично обычной логарифмической линейке. На неподвижной части нанесены шкалы температуры и влаж-

ности, а на движке — шкалы давления и поправок. Масштаб шкал выбирался в соответствии с (10).

Значение поправки определяется по параметрам воздуха следующим образом. Пользуясь стеклянным визиром, отмечают значение температуры, равное измеренной. Затем перемещают движок до совпадения риски со значением давления. После этого, перемещая визир, совмещают его с показаниями влажности и по шкале поправок отмечают величину $\frac{\Delta \lambda}{\lambda} \cdot 1234 \cdot 10^{-3}$. Коэффициент c_4 для ввода в электронную систему равен обратной величине полученной поправки. Для его нахождения используют стандартную шкалу обратных величин (на рис. 2 она не показана). Установкой в шифраторе электронной системы коэффициента c_4 заканчивается подготовка прибора к работе.

Предварительное испытание интерферометра со стабилизированным лазером [1, 2] и электронной системой [7] проводилось в лабораторных условиях. Для этой цели использовались направляющие универсального измерительного микроскопа фирмы К. Цейсс. Предварительно они были исследованы при помощи клиновидного интерферометра типа Фабри — Перо. Непрямолинейность направляющих лежала в пределах $1''$. На микроскоп устанавливали навстречу друг другу два интерферометра. Призмы монтировались на одной подставке, жестко связанной с подвижным столом. Визирные оси интерферометров были выставлены параллельно линии движения стола с точностью до $1'$. Величина перемещения призм составляла 200 мм.

При проведении измерений сравнивались показания обоих интерферометров. Разность показаний во всех случаях не превышала 0,2 мкм (2 импульса). Несовпадение не зависело от длины измеряемого интервала и объяснялось различной начальной фазой сигналов, поступающих на фотоприемники. Определение длины шкалы по одному из интерферометров показало, что разброс ряда из десяти измерений лежит в пределах 0,3 мкм. Эти расхождения следует считать удовлетворительными, так как в погрешность входит ошибка наведения микроскопа на штрих шкалы, которая в нашем случае была того же порядка.

При производственных испытаниях лазерный интерферометр был смонтирован в прецизионный координатно-расточной станок. Перемещение стола станка составляло 600 мм. Показания интерферометра сравнивались с показаниями штриховых метров 2-го разряда. Наведение на

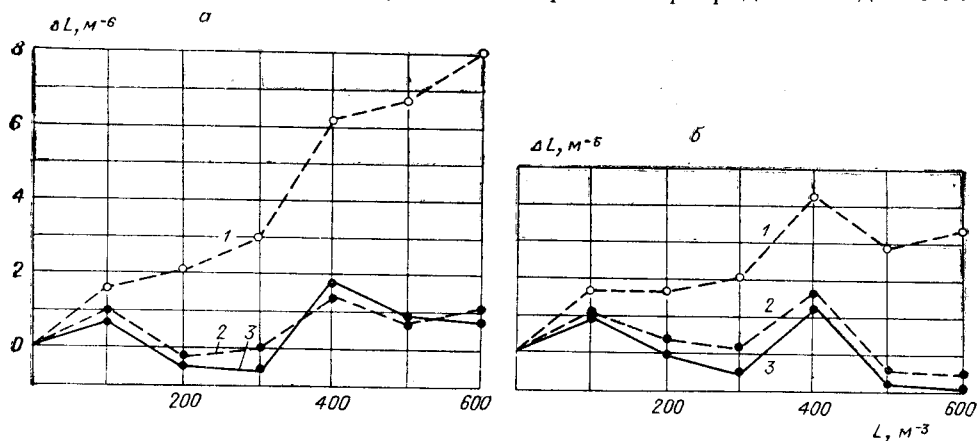


Рис. 3. Результаты измерений интервалов шкалы 175/60 (а) и шкалы 173/60 (б): 1 — график показаний интерферометра без введения поправок; 2 — график показаний интерферометра, приведенных к нормальным условиям; 3 — график погрешности шкалы по аттестату.

штрихи шкалы производилось при помощи фотоэлектрического микроскопа с точностью до 0,1 мкм. Результаты однократных измерений для двух образцовых шкал представлены на рис. 3. Максимальное расхождение между показаниями лазерного интерферометра и аттестатом шкалы не превышает 0,7 мкм. Такое расхождение можно считать незначительным, так как при измерениях не принимались специальные меры для поддержания постоянной температуры. Испытания проводились в обычном цехе машиностроительного завода. Температура отличалась от нормальной на 1,5°C. При измерениях не соблюдался принцип компарирования, и поэтому погрешности, вызванные непрямолинейностью направляющих, вошли в результат.

Таким образом, испытания показали, что разработанный лазерный интерферометр представляет собой прибор высокой точности, который может применяться как в лабораторных, так и в производственных условиях в качестве отсчетного устройства в различного рода координатно-измерительных машинах, инструментальных микроскопах, прецизионных станках.

ЛИТЕРАТУРА

1. Г. А. Ленкова, А. И. Лохматов, И. А. Михальцова. Одночастотный стабилизированный гелий-неоновый лазер.— *Автометрия*, 1971, № 1.
2. А. И. Лохматов, В. А. Ханов. Система стабилизации частоты газового лазера по провалу Лэмба.— *Автометрия*, 1971, № 1.
3. Н. Р. Батарчукова. Новое определение метра. М., Стандартгиз, 1964.
4. K. D. Mielenz, K. F. Nefflen, W. R. Rowley, D. C. Wilson, E. Engelhard. Reproducibility of Helium-neon Laser Wavelengths at 633 nm.— *Appl. Optics*, 1968, v. 7, № 2.
5. B. Edlen. The Dispersion of Air.— *Metrologia*, 1966, v. 2, № 2.
6. F. Glantschnig, M. Leroux, F. Mottier, F. K. von Willis en. An Automatic Fringe-Counting Laser Interferometer for Application to Industrial Metrology.— *Lasers*, 1967, № 8.
7. В. П. Кирьянов, И. Ф. Клисторин, А. М. Щербаченко. Электронное устройство счета и регистрации для лазерного измерителя перемещений.— *Автометрия*, 1971, № 1.

*Поступила в редакцию
24 сентября 1970 г.*