

Цикл измерения	Проверяемые точки	Показания ФОУ-1, мм	Приведенный размер рабочего эталона, мм	Отклонения показаний ФОУ-1 от приведенного размера эталона, мкм	Отклонение от среднего (δ), мкм	δ^2 , мкм ²
1	0	000.0001	1000.01524	+0,16	+0,21	0,04
	1000	1000.0155				
2	0	000.0000	1000.01567	+0,23	+0,28	0,08
	1000	1000.0159				
3	0	000.0000	1000.0164	-0,10	-0,05	0,002
	1000	1000.0163				
4	0	000.0001	1000.0163	-0,20	-0,15	0,02
	1000	1000.0162				
5	0	-000.0001	1000.0167	-0,16	-0,11	0,01
	1000	1000.0185				
6	0	000.0001	1000.0164	-0,20	-0,15	0,02
	1000	1000.0163				
7	0	000.0001	1000.0165	-0,20	-0,15	0,02
	1000	1000.0164				
8	0	000.0000	1000.01643	-0,03	+0,02	0,0004
	1000	1000.0164				
9	0	-000.0001	1000.01608	+0,22	+0,27	0,07
	1000	1000.0162				
10	0	000.0000	1000.0164,9	-0,19	-0,14	0,02
	1000	1000.0163				

Таким образом, метрологические испытания ФОУ-1 показали, что прибор может применяться в качестве отсчетного устройства высокой точности в координатно-измерительных машинах, инструментальных микроскопах, прецизионных станках, а также как датчик линейных перемещений для измерения физических величин, выражаемых через длину.

Поступила в редакцию 7 января 1975 г.

УДК 621.373.826:621.317

**С. Н. АТУТОВ, В. П. БЕССМЕЛЬЦЕВ, В. Н. БУРНАШОВ,
В. В. ВОРОБЬЕВ, В. П. КОРОНКЕВИЧ, А. И. ЛОХМАТОВ,
В. С. СОБОЛЕВ, В. А. ШАТАЛОВ**

(Новосибирск)

ИЗМЕРИТЕЛЬ УГЛОВЫХ И ЛИНЕЙНЫХ ПЕРЕМЕЩЕНИЙ НА ОСНОВЕ ДВУХЧАСТОТНОГО ЛАЗЕРА

Высокая стабильность излучения лазера позволяет использовать его длину волны как образцовую меру расстояния при создании интерферометров для измерения линейных и угловых перемещений [1]. По нашему мнению, в ближайшие годы лазерные измерители перемещений заменят все другие средства измерения длин не только в учреждениях метрологической службы, но и непосредственно в промышленности, особенно в таких ее отраслях, как станкостроение и т. п.

Первое поколение подобных измерителей — это двухлучевые интерферометры майкельсоновского типа с источником излучения в виде одностороннего стабилизированного лазера. Фаза сигнала подобных приборов пропорциональна перемещению подвижного отражателя. Измерение длины осуществляется путем подсчета числа полупериодов получаемого сигнала при перемещении отражателя: электронная система прибора формирует импульсы в моменты пересечения сигналов заданного уровня, подсчитывает число и умножает его на длину волны лазера. Необходимо отметить, что частота сигнала этих интерферометров прямо пропорциональна скорости перемещения отражателя, и, следовательно, спектр сигнала простирается до нулевых частот. Это обстоятельство является причиной всех недостатков лазерных измерителей перемещений первого поколения, поскольку дрейф нуля усилителей и формирователей приводит к погрешности измерений и ненадежной работе всего устройства в целом. Они оказываются чувствительными к изменению мощности излучения лазера, отраженного от подвижного зеркала.

Следующий этап развития лазерных интерферометров для измерения перемещений связан с использованием двухчастотного излучения [2]. Спектр получаемого сигнала в этом случае переносится на разностную частоту, в связи с чем решаются все проблемы надежности работы измерителя, легко определяется знак перемещения, достигается возможность практически безграничного повышения разрешающей способности метода.

В настоящей статье описаны принципы построения, результаты лабораторной проверки и технические характеристики созданного в ИАЭ СО АН СССР измерителя угловых или линейных перемещений ДИП-2 на основе двухчастотного лазера с зеемановским расщеплением частоты, обеспечивающего примерно в 10 раз более высокую разрешающую способность при измерении перемещений (2 нм), чем у выпускающихся за границей лучших образцов аналогичных приборов.

Структурная схема ДИП-2 приведена на рис. 1. Прибор состоит из двух блоков: собственно интерферометра и электронного блока обработки. Интерферометр включает в себя систему стабилизации оптической частоты лазера (СОЧ) и лазерный датчик (блоки 1—3 рис. 2), представляющий собой классический интерферометр (Майкельсона), в котором плоские зеркала заменены на уголкового и имеются оптические фильтры для разделения излучения лазера по частоте.

Рассмотрим работу измерителя. Излучение He—Ne-лазера 4, помещенного в аксиальное магнитное поле, оптических частот f_1 и f_2 с правой и левовращающимися круговыми поляризациями преобразуется четвертьволновой пластинкой 5 в излучение с взаимно перпендикулярными поляризациями и подается на полупрозрачное зеркало 7 [3]. Расширитель пучка 6 (с 12,5-кратным увеличением) уменьшает расходимость пучка, что в конечном итоге при разности хода оптических путей опорного 9 и информационного 10 отражателей в 120 м дает уменьшение контраста интерференционных полос не более чем в 5 раз. Луч света, отраженный от подвижного отражателя 10, дважды проходит четвертьволновую пластинку 8, в результате чего плоскости поляризации излучения поворачиваются на 90°. Таким образом, в результате рекомбинации лучей на светоделительной пластине будут интерферировать две пары лучей, которые с помощью зеркала 13 подаются на анализатор 16. Анализатором 16 выделяется та или другая пара компонентов излучения различных оптических частот и одинаковых поляризаций и передается на информа-

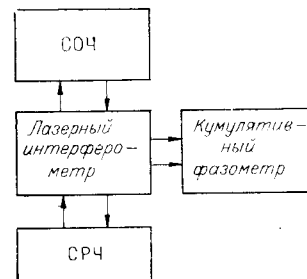


Рис. 1.

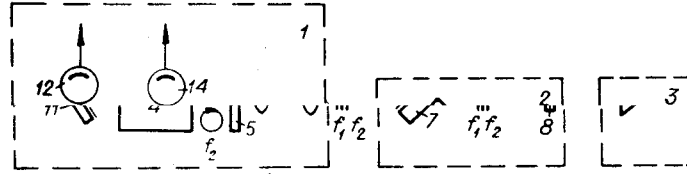


Рис. 2.

ционный фотоприемник 14. При неподвижном отражателе 10 интерференция пучков света разных частот на поверхности фотоприемника 14 даст сигнал разностной частоты. При движении отражателя идущее от него излучение приобретет доплеровское смещение частоты

$$f_d = 2v/\lambda,$$

где v — скорость отражателя, а λ — длина волны падающего на него света. В зависимости от направления движения частота сигнала информационного фотоприемника будет равна

$$f_n = f_0 \pm f_d,$$

где f_0 — разность частот излучения лазера.

На опорный фотоприемник 12 излучение лазера попадает с помощью зеркала 11, пройдя через анализатор 15. Выделенные им компоненты поля интерферируют, создавая опорный сигнал разностной частоты f_0 .

Рассмотрим теперь фазовые соотношения полученных сигналов. Полагая напряженности электрических полей волн частот f_1 и f_2 в начале их оптических путей (на выходе лазера) равными:

$$\dot{E}_1 = E_1 \exp j(\omega_1 t + \varphi_1); \quad (1)$$

$$\dot{E}_2 = E_2 \exp j(\omega_2 t + \varphi_2)$$

(здесь $\omega_1 = 2\pi f_1$, $\omega_2 = 2\pi f_2$; φ_1 и φ_2 — начальные фазы), получим напряженности, создаваемые этими волнами на поверхностях фотоприемников опорного и информационного сигналов:

$$\dot{E}_0 = E_1 \exp j\left(\omega_1 t + \varphi_1 - 2\pi \frac{l_0}{\lambda_1}\right) + E_2 \exp j\left(\omega_2 t + \varphi_2 - 2\pi \frac{l_0}{\lambda_2}\right); \quad (2)$$

$$\dot{E}_n = E_1 \exp j\left(\omega_1 t + \varphi_1 - 2\pi \frac{l_1}{\lambda_1}\right) + E_2 \exp j\left(\omega_2 t + \varphi_2 - 2\pi \frac{l_2}{\lambda_2}\right),$$

где l_0 — длина оптического пути от лазера до фотоприемника 12; l_1, l_2 — длины оптических путей от лазера до фотоприемника 14 через угловые отражатели 9 и 10 соответственно; $\lambda_1 = c/f_1$, $\lambda_2 = c/f_2$ (c — скорость света в воздухе).

Поскольку выходной ток фотоэлектронного детектора является квадратичной функцией напряженности, создаваемой на его поверхности, то выходные токи фотоприемников опорного и информационного сигналов будут равны соответственно:

$$I_0 = k \dot{E}_0 E_0^* \quad \text{и} \quad I_n = k \dot{E}_n E_n^*, \quad (3)$$

т. е.

$$I_0 = k \left\{ E_1^2 + E_2^2 + 2E_1E_2 \cos \left[(\omega_1 - \omega_2)t + \varphi_1 - \varphi_2 - 2\pi \left(\frac{l_0}{\lambda_1} - \frac{l_0}{\lambda_2} \right) \right] \right\}; \quad (4)$$

$$I_n = k \left\{ E_1^2 + E_2^2 + 2E_1E_2 \cos \left[(\omega_1 - \omega_2)t + \varphi_1 - \varphi_2 - 2\pi \left(\frac{l_1}{\lambda_1} - \frac{l_2}{\lambda_2} \right) \right] \right\},$$

где k — коэффициент передачи фотоэлектронного детектора, который не равен нулю только для постоянной составляющей и составляющей разностной частоты ($f_1 - f_2$).

Таким образом, фаза опорного сигнала на фотоприемнике 12 имеет вид

$$\psi_0 = \omega_1 t + \varphi_1 - 2\pi \frac{l_0}{\lambda_1} - \left(\omega_2 t + \varphi_2 - 2\pi \frac{l_0}{\lambda_2} \right), \quad (5)$$

а фаза информационного сигнала на фотоприемнике 14 вид

$$\psi_n = \omega_1 t + \varphi_1 - 2\pi \frac{l_1}{\lambda_1} - \left(\omega_2 t + \varphi_2 - 2\pi \frac{l_2}{\lambda_2} \right). \quad (6)$$

Разность фаз информационного и опорного сигналов

$$\psi_n - \psi_0 = \frac{2\pi(l_0 - l_1)}{\lambda_1} - \frac{2\pi(l_0 - l_2)}{\lambda_2}, \quad (7)$$

а так как $\lambda_1 \cong \lambda_2 \cong \lambda$, то

$$\psi_n - \psi_0 = \frac{2\pi(l_2 - l_1)}{\lambda} = \frac{2\pi L}{\lambda}. \quad (8)$$

Отсюда следует, что перемещение уголкового отражателя можно выразить через полную разность фаз сигналов информационного и опорного фотоприемников:

$$\Delta L(t) = \frac{\lambda}{2\pi} [\Delta\psi_n(t) - \Delta\psi_0(t)], \quad (9)$$

где λ — значение длины волны излучения лазера в воздухе при заданных условиях измерения.

Синусоидальные сигналы опорного и информационного фотоприемников усиливаются, преобразуются в прямоугольные импульсы и подаются на входы кумулятивного фазометра, осуществляющего в соответствии с (9) измерение разности фаз (в целых и дробных величинах периода опорного сигнала) и умножение этой разности на половину длины волны лазера.

Для повышения разрешения и усреднения значений вибрационных перемещений в измерителе имеется возможность переключения времени измерения и усреднения результатов единичных измерений в 256 раз. Разрешение прибора при таком усреднении: минимальной длине плеча интерферометра и отношении сигнал/шум $< 3\%$ — не хуже 2 нм. В приборе предусмотрен выход на ЭВМ и цифропечатающее устройство.

Обеспечение высоких метрологических характеристик измерителя требует наличия высококачественной системы стабилизации оптической частоты. Система стабилизации оптической частоты лазера обеспечивает стабильность частоты не хуже чем 10^{-7} . Работа системы основана на сравнении интенсивностей излучений лазера круговых поляризаций различного направления и регулировании длины резонатора лазера пьезокерамикой так, чтобы эти интенсивности были одинаковы [4].

Для получения высокой разрешающей способности измерителя порядка 30 нм при достаточно малых временах измерения (64 мкс) система стабилизации разностной частоты (СРЧ) выполнена по схеме фазовой автоподстройки. Фаза сигнала разностной частоты f_0 «привязывается» СРЧ к фазе сигнала частоты f_s с выхода кварцевого генерато-

ра, входящего в СРЧ. Схема СРЧ реализует принципы импульсно-фазовой автоподстройки частоты. В качестве фазового детектора используется R—S-триггер. Изменение скважности вырабатываемых триггером импульсов пропорционально ошибке по фазе. Этот сигнал через повторитель управляет током соленоида, внутри которого помещается активный элемент лазера.

Испытания прибора ДИП-2 были проведены с помощью измерительного микроскопа типа «К. Цейсс — Йена» № 2722 с 200 мм шкалой, цена деления микроскопа 1 мкм. Уголковый отражатель устанавливался на подвижную (измерительную) часть микроскопа, а интерферометр на его неподвижном основании. Измерения длины шкалы микроскопа прибором ДИП-2 показали, что их точность определялась только точностью измерительного микроскопа и основную погрешность измерения составляла погрешность наведения на штрих шкалы измерительного микроскопа. Многократные измерения длины шкалы микроскопа (наводка на штрих шкалы производилась по его визирю) дали среднеквадратичное отклонение от среднего $\sigma=0,12$ мкм. По измерениям длины шкалы микроскопа, выполненным при различных температурах, был вычислен ее коэффициент линейного расширения α (естественно, что при этом учитывались температура и давление воздуха). Он оказался равным $(96 \pm 5) \cdot 10^{-3}$. По паспортным данным $\alpha=102 \cdot 10^{-3}$ в диапазоне температур 15—22° С.

Проверка стабильности нуля лазерного измерителя производилась следующим образом. Уголковый отражатель прикреплялся к выносному интерферометру и в течение 6 часов записывались показания прибора. Одновременно измерялась температура выносного интерферометра. Максимальная нестабильность нуля прибора, вычисленная с поправкой на температурное расширение системы отражатель — интерферометр, составляла не более 30 нм/ч.

Затем были проведены измерения перемещений при максимально возможном расстоянии при мощности двухчастотного лазера 20 мкВт. Нормальная работа прибора наблюдалась до расстояния в 60 м; при этом расстоянии сигнал информационного фотоприемника уменьшился в 5 раз по сравнению с сигналом на расстоянии в 1 м.

Были проведены также измерения угловых перемещений методом, подробно описанным в [5], в диапазоне 0 ± 12 , т. е. в диапазоне измерения автоколлиматора АК-1 со средним отклонением от показаний этого прибора $\pm 4 \cdot 10^{-3}$ мин. Максимальный диапазон измерения углов составляет $\pm 20^\circ$.

Таким образом, прибор ДИП-2 имеет следующие характеристики: пределы измерения перемещений 0—60 м; пределы измерения скорости $0 \pm 0,3$ м/с; погрешность измерения перемещения: без усреднения $(-10^{-7}L + 10^{-8})$ м, с усреднением $(10^{-7}L + 2 \cdot 10^{-9})$ м; разрешающая способность измерения перемещений $2 \cdot 10^{-9}$ м; минимальное время выдачи результатов: а) при измерении перемещения без усреднения 64 мкс, с усреднением 16 мс; б) при измерении скорости 16 мс; стабильность нуля не хуже 30 нм/ч.

Кроме того, прибор обеспечивает:

а) широкий диапазон изменения времени единичного измерения (64 мкс — 64 мс) и времени выдачи усредненных результатов (16 мс — 16 с);

б) малую чувствительность к вибрациям, турбулентности и загрязнению атмосферы;

в) возможность ввода поправки на изменение атмосферных условий с максимальным быстродействием.

Конструктивно измеритель выполнен в виде четырех блоков: электронного блока обработки сигнала; блока, включающего в себя стабилизированный лазер с источником питания; собственно интерферометра

(узел 2, рис. 2), несущая часть которого выполнена из инвара, и углового отражателя. Такое конструктивное исполнение позволило значительно повысить стабильность нуля прибора и проводить точные измерения при значительном удалении выносного интерферометра от лазера.

ЛИТЕРАТУРА

1. В. П. Коропкевич, Г. А. Ленкова. Лазерный интерферометр для измерения длины.— «Автометрия», 1971, № 1.
2. Интерференционная система. Пат. США, кл. 356—106, № 3458259, опубл. 29.07.69.
3. T. C. Polanyi, H. L. Skolnick, J. Tobias. Frequency stabilization of a gas laser using optical resonance amplification techniques.— "IEEE J. Quant. Electr.", 1966, vol. QE-2, p. 152—153.
4. М. И. Дьяконов, С. А. Фридрихов. Газовый лазер в магнитном поле.— «Успехи физ. наук», 1966, т. 90, вып. 4.
5. С. Н. Атутов и др. Интерферометр на основе двухчастотного лазера для измерения линейных или угловых перемещений.— В кн. докладов: «Применение оптико-электронных приборов в измерительной технике». М., 1973.

Поступила в редакцию 24 апреля 1975 г.

УДК 531.7:621.317

**В. М. ВЕДЕРНИКОВ, В. П. КИРЬЯНОВ, Б. Г. МАТИЕНКО,
А. М. ЩЕРБАЧЕНКО**
(Новосибирск)

МИКРОЭЛЕКТРОННЫЙ СЧЕТНО-ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫЙ БЛОК ЛАЗЕРНОГО ИЗМЕРИТЕЛЯ ПЕРЕМЕЩЕНИЙ ИПЛ-2

Дальнейшее развитие работ по созданию прецизионных лазерных измерительных устройств, изложенных в [1, 2], привело к созданию в Институте автоматки и электротрии СО АН СССР лазерного измерителя перемещений ИПЛ-2.

По сравнению с [2] наиболее значительным усовершенствованиям подвергся счетно-вычислительный блок (СВБ) измерителя перемещений. Как и прежде, к его основным функциям относятся реверсивный счет интерференционных полос, умножение полученного числа на значение предварительно определенной длины волны источника света и вывод результата вычислений на цифровой индикатор или другой регистратор. Большое внимание при проектировании принципиальной схемы СВБ уделялось проблеме унификации и технологичности узлов СВБ и обеспечения его высокой функциональной гибкости. С этой точки зрения весьма перспективным оказалось использование в СВБ схемы дифференциального интегратора с последовательным переносом [3]. На рис. 1 приведена структурная схема СВБ лазерного измерителя перемещений ИПЛ-2. В формирующую часть СВБ входят дискриминаторы Д1, Д2 триггера Шмитта, учетверитель и устройство проверки (УП) работоспособности СВБ.

Перемножающая часть СВБ состоит из реверсивного счетчика Сч1, декадных умножителей — сумматоров SM1—SM7, регистра коэффициента умножения RG и выходной сборки ИЛИ. Регистрирующая часть СВБ содержит реверсивный счетчик результата измерения Сч2, устрой-