

УДК 531.715 : 621.373.826

В. П. Кирьянов, Г. А. Ленкова, А. И. Лохматов, Г. Г. Тарасов
(Новосибирск)

ЛАЗЕРНЫЙ ИНТЕРФЕРОМЕТР
ЛИНЕЙНЫХ И УГЛОВЫХ ПЕРЕМЕЩЕНИЙ

Рассматриваются два варианта построения схем лазерных интерферометров на базе одночастотных лазеров с линейной поляризацией выходного излучения, отличающиеся оригинальной методикой обработки сигналов на постоянном токе. Приводятся результаты экспериментальных исследований и использования предложенных интерферометров в прецизионных системах управления.

Анализируя возможные варианты построения интерференционных преобразователей линейных и угловых перемещений на базе полупроводниковых лазеров и имея опыт создания лазерных интерферометров с обработкой сигналов на постоянном токе [1], с фазовой модуляцией [2, 3] и двухчастотных [4], авторы пришли к мнению, что в данном случае целесообразнее использовать интерферометры перемещений «постоянного тока». Для получения простой и надежной конструкции был разработан оригинальный способ формирования оптических сигналов интерферометра [5], который экспериментально исследован в двух вариантах интерференционных преобразователей перемещений и в системе управления движением портала лазерного фотопостроителя.

Принципиальная оптическая схема нового интерференционного преобразователя приведена на рис. 1. Здесь 1 — источник линейно-поляризованного одночастотного излучения (газовый или полупроводниковый лазер), 2 — фазовая пластинка $\lambda/2$, 3 — поляризационный светоделительный кубик, 4 и 5 — уголкового отражатели, 6 — фазовая пластинка $\lambda/4$, 7 — фазовая дифракционная решетка, 8 — поляризационные анализаторы, 9 — фотоприемники.

Вектор поляризации излучения лазера 1, направляемого в интерферометр, ориентируется под углом 45° к плоскости падения на светоделительную грань кубика 3. Это достигается поворотом лазера вокруг собственной оси или с помощью фазовой пластинки 2. Поляризационный кубик 3 делит входное излучение на две части со взаимно ортогональными векторами поляризации, которые направляются в референтное и измерительное плечи интерферометра. Уголкового отражатели 4 и 5 возвращают пучки на светоделитель 3, объединяющий их в единый выходной пучок. Фазовая пластинка 6 преобразует линейные поляризации составляющих выходного пучка в циркулярные с противоположными направлениями вращения. Фазовая дифракционная решетка 7 делит выходной пучок на три части с равными интенсивностями, что достигается выбором соответствующих параметров решетки. В каждой из частей с помощью поляризаторов 8 устанавливается необходимый фазовый сдвиг, например, 0 и $\pm 90^\circ$ ($\pi/2$). Фотоприемники 9 преобразуют падающее на них излучение в электрические сигналы вида

$$\begin{aligned}U_1 &= U_0 + U_m \sin 2\pi L/\lambda, \\U_2 &= U_0 + U_m \sin [(2\pi L/\lambda) + (\pi/2)], \\U_3 &= U_0 + U_m \sin [(2\pi L/\lambda) - (\pi/2)].\end{aligned}\quad (1)$$

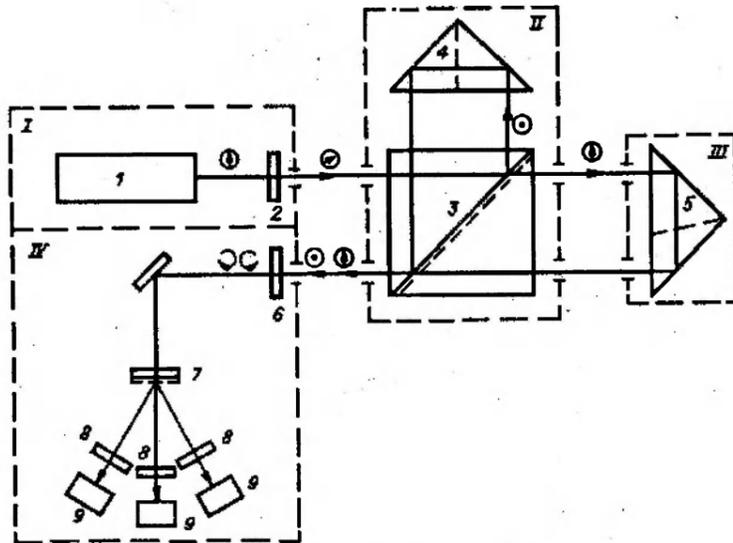


Рис. 1

где U_0 — постоянная составляющая сигнала, U_m — амплитуда переменной составляющей, $2\pi L/\lambda$ — фаза переменной составляющей, L — изменение оптической разности хода, λ — длина волны излучения лазера.

Основное отличие рассмотренного здесь способа от известных, например [6], в том, что преобразование линейных поляризаций в круговые осуществляется вне интерферометра, после совмещения измерительного и референтного пучков, что позволяет заметно упростить конструкцию прибора в целом и повысить стабильность его работы. Формирование интерференционных полей реализуется с помощью одной фазовой пластинки $\lambda/4$, фазовой дифракционной решетки и трех поляризаторов. Фазовая пластинка для преобразования поляризаций вводится одновременно в оба интерферирующих пучка, поэтому требования к точности ее изготовления ниже, чем в тех схемах, где она устанавливается в одном из плеч интерферометра. Использование дифракционной решетки вместо светоделительных кубиков дает возможность создавать компактные оптические схемы. При необходимости выходной пучок может быть разделен на любое другое число пучков с равными интенсивностями.

Предложенный способ позволяет вынести оптические элементы, предназначенные для разделения интерференционных сигналов и формирования фазовых сдвигов, из интерферометра и соединить их конструктивно с регистрирующей частью. Это создает определенные удобства при блочной конструкции интерферометра. На рис. 1 объединение элементов в блоки показано штриховыми линиями: I — лазерная головка, II — интерферометр, III — подвижный отражатель, размещаемый на объекте, и IV — блок регистрации.

В блоке регистрации IV электрические сигналы (1) подвергаются преобразованию с целью устранения постоянных составляющих U_0 как основного дестабилизирующего фактора в процессе формирования импульсных сигналов из аналоговых. Для этого сигналы (1) попарно вычитают один из другого:

$$\begin{aligned}
 U_2 - U_1 &= U_0 + U_m \sin[(2\pi L/\lambda) + (\pi/2)] - [U_0 + U_m \sin(2\pi L/\lambda)] = \\
 &= \sqrt{2} U_m \sin[(2\pi L/\lambda) + (\pi/4)] \quad (2)
 \end{aligned}$$

и

$$U_3 - U_1 = U_0 + U_m \sin[(2\pi L/\lambda) - (\pi/2)] - [U_0 + U_m \sin(2\pi L/\lambda)] = \\ = \sqrt{2} U_m \sin[(2\pi L/\lambda) - (\pi/4)]. \quad (3)$$

Сформированные таким образом сигналы (2) и (3) сохраняют взаимный 90° -ный сдвиг $(\pi/2)$, не имеют постоянной составляющей и при высоком отношении сигнал/шум позволяют осуществлять реверсивный счет полос при значительном изменении параметров излучения.

На рис. 2 приведена структурная схема блока регистрации, состоящего из трех фотоприемников $\Phi 1$ — $\Phi 3$, трех преобразователей фототока в напряжение $A1$ — $A3$, двух сумматоров $A4$, $A5$, двух компараторов $A6$, $A7$ и четырех

Экспериментальные исследования интерферометра с He—Ne-лазером показали, что работоспособность компараторов сохранялась при уменьшении (с помощью «серого клина») интенсивности света на входе или в любом из плеч интерферометра в 12 раз (или на 92 %). При тщательной настройке блока регистрации его работоспособность сохранялась при уменьшении света в 20 раз (или на 95 %), что находится на уровне показателей лучших мировых интерферометров [7].

Одним из авторов данной статьи было показано в [8], что минимальные потери света в плечах интерферометра обеспечиваются в тех случаях, когда уголкового отражателя ориентируются таким образом, чтобы одно из их ребер и оптическая ось лежали в плоскости, параллельной вектору поляризации падающего на них излучения. В описанной выше схеме (см. рис. 1) не удается получить оптимальные условия отражения в обоих плечах, так как векторы поляризации в них взаимноортогональны и реализация вышеуказанных условий отражения приведет к тому, что в одном из плеч интерферометра пучок будет попадать на ребро призмы. В результате потери света возрастут больше, чем в неоптимизированном случае.

Более выгодные условия обеспечивает схема интерферометра двойного прохождения с плоским зеркалом в измерительном плече (рис. 3). В настоящее время эта схема получила широкое распространение в измерительных системах высокоточных двухкоординатных столов современных литографических установок с применением двухчастотного лазера [9].

В нашем случае линейно-поляризованное излучение одночастотного He—Ne-лазера ориентируется под углом 45° к базовой плоскости кубика 1, который отклоняет составляющую с вертикально ориентированным вектором поляризации в референтное плечо, а составляющую с горизонтально ориентированным вектором пропускает в измерительное плечо. Уголкового отражателя 2 ориентирован так, что его ребро лежит в плоскости, параллельной вектору поляризации, и, следовательно, излучение возвращается с минимальными потерями. Вторая часть излучения направляется на плоское зеркало 4, пройдя предварительно четвертьволновую фазовую пластинку 3. За пластинкой 3 излучение становится циркулярно-поляризованным. После отражения от плоского зеркала 4 и второго прохода пластинки 3

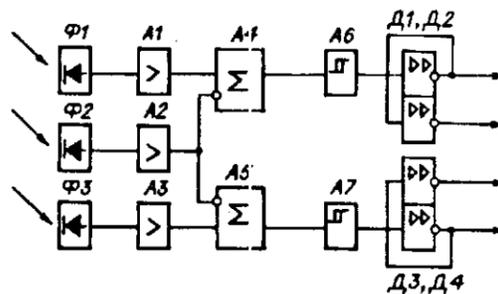


Рис. 2

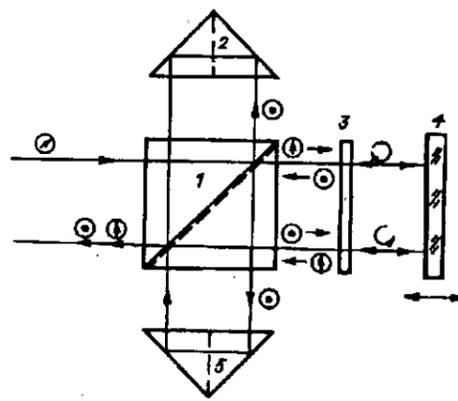


Рис. 3

вектор поляризации становится вертикально ориентированным и в результате этого отражается от светоделительной плоскости на угловой отражатель 5. По аналогии с 2 ребро отражателя 5 располагается в плоскости, параллельной вектору поляризации, что обеспечивает минимальные потери и в этом плече. После возврата из 5 излучение повторно отражается от светоделительной плоскости кубика 1 и направляется на зеркало 4. В результате двойного прохождения излучения через пластинку 3 вектор поляризации повернется дополнительно на 90° и станет горизонтально ориентированным. Светоделительная плоскость кубика 1 пропустит это излучение на выход, совместив про-

странственно его с составляющей из референтного плеча. И вновь, как в основном варианте, выходной пучок интерферометра будет представлен суперпозицией невзаимодействующих составляющих со взаимно ортогональными векторами поляризации. Выделение сигнала интерференции и его дальнейшая обработка реализуются аналогично схеме на рис. 1.

Рассмотренные выше интерферометры (см. рис. 1, 2) были использованы в качестве датчиков обратной связи в системах управления перемещением портала лазерных фотопостроителей субмикронного разрешения [10]. Для проверки потенциальных возможностей этих систем проводилась серия тестовых испытаний по отработке микроперемещений. На рис. 4 (кривая 1) приведена запись одного из таких тестов. Здесь задавалась серия шагов микроперемещений, равных 80, 40, 20, 10, 5, 2,5 и 1,25 нм, с последующим возвратом на исходную позицию после каждого шага. Для регистрации результатов отработки этих перемещений был разработан специальный модуль, преобразу-

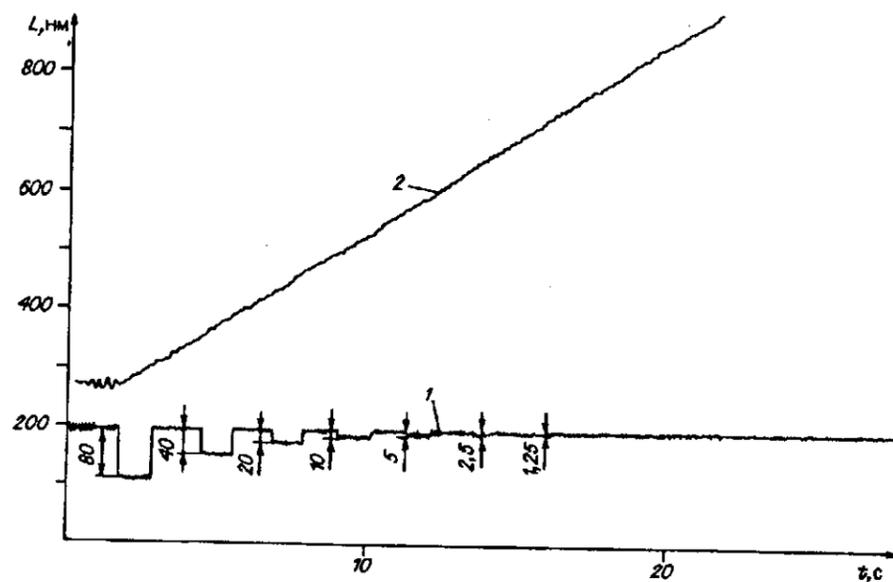


Рис. 4

ющий периодически сигналы интерферометра в аналоговый сигнал, который в диапазоне $+25,6$ мкм линейно пропорционален текущей координате перемещаемого объекта (портала). Как видно из результата записи, система уверенно обрабатывает микроперемещения в диапазоне до 10 нм, более мелкие шаги: 5 , $2,5$ и $1,25$ нм — «тонут» в шумах. Природа этих шумов детально не исследовалась, но наиболее вероятно, что они представляют собой микросейсмические, не подавленные системой виброзащиты. Статистическая обработка данных интерферометра в управляющем компьютере показала, что система в среднем обрабатывает и более мелкие, чем 10 нм, шаги, вплоть до $1,25$ нм.

Высокая чувствительность систем управления, созданных на базе описанных выше интерферометров, позволяет в широких пределах (до 80 дБ) регулировать скорость движения портала, причем нижний предел лежит в диапазоне единиц нанометров в секунду. На рис. 4 (кривая 2) приведена запись теста движения портала с малой ($V = 35$ нм/с) скоростью. Анализируя мгновенное отклонение текущих координат портала от их расчетных значений, можно дать оценку качества режимов сверхмалых скоростей, которая для данного случая составляет около 3% . При больших перемещениях, когда используется режим позиционирования портала с квазиоптимальным законом управления [11], система допускает движение портала с максимальной скоростью, достигающей $0,3$ м/с.

В заключение авторы выражают свою признательность В. П. Коронкевичу за внимание и ценные рекомендации, высказанные им в ходе выполнения данной работы.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Коронкевич В. П., Ленкова Г. А. Лазерный интерферометр для измерения длины // Автометрия.—1971.—№ 1.
2. Кирьянов В. П., Коронкевич В. П. Лазерный интерферометр с низкочастотной фазовой модуляцией // Квантовая электрон.—1982.—9, № 7.
3. Ведерников В. М., Кирьянов В. П., Коронкевич В. П., Ленкова Г. А. Многофункциональный лазерный измеритель перемещений ИПЛ-10 // Лазерные интерферометры.—Новосибирск: ИАиЭ СО АН СССР, 1978.
4. Атутов С. Н., Бессмельцев В. П., Бурнашов В. И. и др. Измеритель угловых и линейных перемещений на основе двухчастотного лазера // Автометрия.—1975.—№ 5.
5. А. с. 1768957 СССР. Способ создания интерференционных полей с фазовым сдвигом от 0 до 180° / В. П. Коронкевич, В. П. Кирьянов, Г. А. Ленкова и др.—Опубл. 15.10.92, Бюл. № 38.
6. Пат. 2375577 G 01 B 9/02 Франция. Interferometre destine a la mesure de deplacement / Bernard Fillol.—Publ. 21.07.78.
7. Quenelle R. C., Wuerz Z. J. A new microcomputer — controlled laser dimensional measurement and analysis system // Hewlett-Packard J.—1983.—34, N 4.—P. 3.
8. Ленкова Г. А. Поляризационные явления в лазерных интерферометрах перемещений // Автометрия.—1975.—№ 5.
9. Wilson A. D., Studwell T. Vibration analysis using the stripe scan method of a laser interferometer controlled X—Y table in electron — beam system // J. Vac. Sci. Technol.—1979.—16, N 6.—P. 1819.
10. Кирьянов В. П., Анциферов А. П., Ведерников В. М. и др. Анализ и экспериментальное исследование системы радиальных перемещений лазерного фотопостроителя субмикронного разрешения // Автометрия.—1994.—№ 3.
11. Щербаченко А. М., Юрлов Ю. И. Цифровые регуляторы прецизионных следящих систем позиционирования // Автометрия.—1981.—№ 2.

Поступила в редакцию 11 мая 1994 г.