

УДК 534.511.1

## ВИБРОУСТОЙЧИВЫЙ ОДНОКАНАЛЬНЫЙ ИНТЕРФЕРОМЕТР

А.И. КОНОЙКО, Р.Г. СЕДНЕВ\*, А.М. ПОЛИКАНИН

*Институт физики имени Б.И. Степанова,  
Независимости, 68, 220072, Минск, Беларусь*

*Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники  
П. Бровки, 6, Минск, 220013, Беларусь*

*Поступила в редакцию 21 ноября 2012*

Предлагается метод трансляции световых потоков на базе двулучепреломляющих элементов и поляризационных преобразований, который позволяет исключить влияние дестабилизирующих воздействий за счет того, что в предлагаемом интерферометре опорный и зондирующий световые пучки проходят через одни и те же оптические элементы.

*Ключевые слова:* интерференция, поляризация, двулучепреломляющие элементы, разность фаз, вращатель поляризации, анизотропия, интерферометр, виброустойчивость.

### Введение

Развитие nanoиндустрии невозможно без точных и надежных диагностических инструментов. Сканирующая зондовая микроскопия является одной из немногих методик, позволяющих исследовать наноразмерные структуры и визуализировать поверхность материалов с атомарным разрешением. Причем, в отличие от электронных, они не требуют вакуумирования для осуществления измерений [1]. Целесообразность использования интерферометрических методов обусловлена высокой чувствительностью и точностью. Для достижения максимально возможной точности интерферометрических измерений необходима минимизация воздействия внешних факторов, таких как вибрация, флуктуация температуры и т.п. Виброустойчивые интерферометрические системы, образованные линзовой оптикой, обладают весьма небольшим диапазоном измерения линейных перемещений. Поэтому задача синтеза новых методов трансляции световых пучков в интерферометрических системах с целью решения вышеперечисленных проблем является актуальной.

### Виброустойчивый одноканальный интерферометр

Функциональная схема одноканального виброустойчивого интерферометра представлена на рис. 1.

Устройство содержит, последовательно оптически связанные, анализатор поляризации излучения 1, светоделитель 2. Светоделитель выполнен в виде двух одинаковых двулучепреломляющих кристаллов 3 и 4. Они развернуты друг относительно друга на угол  $90^\circ$ , а плоскости, в которых лежат их оптические оси, развернуты относительно главной оси анализатора поляризации излучения под углом  $45^\circ$ . Первый и второй выходы светоделителя оптически связаны соответственно с первым 5 и вторым 6 отражателями. Фотоприемник 7 оптически связан со вторым выходом анализатора поляризации излучения 1, данные с которого поступают на измерительное устройство 8.

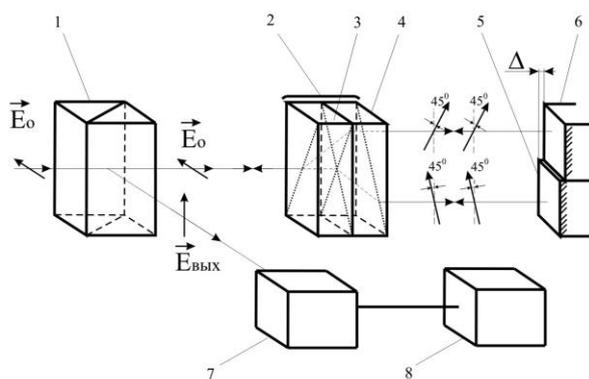


Рис. 1. Оптическая схема виброустойчивого одноканального интерферометра

В качестве источника излучения может использоваться He-Ne лазер с длиной волны используемого лазерного излучения видимого диапазона 0,63 [мкм], 0,48 [мкм], либо внешний источник эталонного излучения. Анализатор поляризации излучения выполнен в виде призмы Глана с двумя выходными поверхностями. Светоделитель представляет собой поляризационный расщепитель, состоящий из первого и второго двулучепреломляющих кристаллов в виде плоскопараллельных кристаллических пластинок из исландского шпата с оптической осью ориентированной под углом ко входной и выходной граням, развернутым друг относительно друга на угол  $90^\circ$ . Первый и второй отражатели выполнены в виде плоскопараллельных пластинок из стекла К-8 с зеркальным покрытием. В качестве фотоприемника может использоваться устройство на базе фотодиода ФД21КП. Измеряющее устройство выполнено на основе ЭВМ.

Виброустойчивый одноканальный интерферометр работает следующим образом. В исходном состоянии плоско поляризованный в горизонтальной плоскости входной световой пучок с длиной волны  $\lambda$ , пройдя анализатор поляризации излучения, поступает на вход светоделителя, где происходит его расщепление на два ортогонально поляризованных световых пучка равной интенсивности.

Один световой пучок испытывает отражение от первого отражателя, а второй – от второго отражателя. После чего они идут в обратном направлении, при этом они приобретают оптическую разность хода равную  $2\Delta_0$ , где  $\Delta_0$  – начальное смещение друг относительно друга первого и второго отражателей. В обратном ходе они объединяются на выходе светоделителя и интерферируют между собой, что приводит вследствие наличия оптической разности хода  $2\Delta_0$  к изменению поляризации излучения, которое поступает на анализатор поляризации излучения. Он направляет излучение, поляризованное в вертикальной плоскости, идущее в обратном ходе на фотоприемник.

Вследствие того, что в предлагаемом интерферометре световые пучки проходят через одни и те же оптические элементы, разность их оптических путей остается постоянной независимо от возникающих смещений элементов. Таким образом, приведенная схема трансляции световых потоков позволяет исключить влияние дестабилизирующих воздействий (например, механических вибраций).

Зависимость величины интенсивности излучения от наведенной разности фаз между ортогональными световыми пучками на выходе интерферометра будет иметь следующий вид

$$I_{\text{ВЫХ}}(t) = 2I_0 \cos^2\left(\frac{2\pi \cdot \Delta_0}{\lambda}\right) = I_0 + I_0 \cdot \cos\left(\frac{4\pi \cdot \Delta_0}{\lambda}\right). \quad (1)$$

Поскольку расстояние между отражающими поверхностями 5 и 6 изменяется во времени, то заменим переменную  $\Delta_0$  в формуле (1) на функцию  $\Delta(t)$ , где  $\Delta(t)$  – закон изменения расстояния между этими оптическими поверхностями:

$$I_{\text{ВЫХ}}(t) = 2I_0 \cos^2\left(\frac{2\pi \cdot \Delta(t)}{\lambda}\right) = I_0 + I_0 \cdot \cos\left(\frac{4\pi \cdot \Delta(t)}{\lambda}\right). \quad (2)$$

Фотоприемник преобразует световые сигналы в электрические, после чего сигналы поступают на измерительное устройство. В измерительном устройстве электрические сигналы поступают на вход высокоскоростного аналого-цифрового преобразователя, где осуществляется их «оцифровка» и дальнейшая обработка в цифровом виде.

Обработка сигналов может происходить с использованием различных методов. Приведем некоторые из них.

Метод измерения на квазилинейном участке – это метод измерения низкоамплитудных колебаний, или измерения величин, которые лежат в пределах восьмой части длины волны используемого лазерного излучения  $\Delta l = \lambda / 8$ .

Если данные перемещения не выходят за пределы квазилинейного участка функции (1), что соответствует диапазону изменений фазового расстояния в пределах  $[5\pi/4; 7\pi/4]$  с периодичностью  $2\pi$ , то можно утверждать, что закон изменения величины функции интенсивности на выходе интерферометра будет однозначно повторять закон изменения фазового расстояния между ортогональными световыми пучками (рис. 2).

Изменение значения фазового расстояния в пределах  $\Delta\varphi \in [5\pi/4; 7\pi/4]$  соответствует смещению между ортогональными световыми пучками на восьмую часть длины волны используемого лазерного излучения  $\Delta l = \lambda / 8$ . Так, например, для длины лазерного излучения  $\lambda = 0,63$  мкм, перемещения должны находиться в пределах  $\Delta l \approx 78,75$  нм. Стоит также отметить, что нелинейные искажения, вызванные квазилинейностью участка функции интенсивности излучения лазерного излучения, наиболее сильно проявляются в зонах близких к началу и концу квазилинейного участка, при этом, уровень искажений не превышает 1%.

Важной является точная установка рабочей точки при работе с функцией (1) в область середины квазилинейного участка, которая определяется в процессе калибровки интерферометра. В дальнейшем сигнал с фотоприемника может сразу поступать на устройство индикации, в роли которого может выступать осциллограф или анализатор спектра. В некоторых случаях может потребоваться предварительное усиление сигнала.

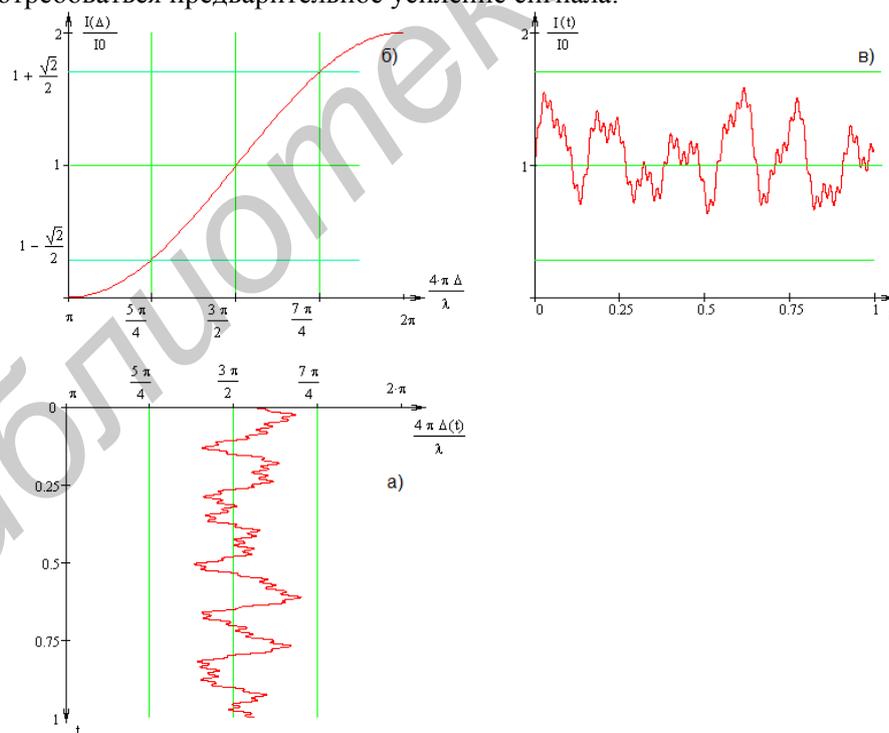


Рис. 2. Измерение интенсивности на квазилинейном участке:

*a* – случайное относительное перемещение во времени; *б* – зависимость нормированного значения мгновенной интенсивности от смещения; *в* – значение интенсивности на выходе интерферометра

Метод измерения счетом полос – это метод измерения линейного поступательного движения. При движении одной отражательной поверхности относительно другой, происходит

смещение между ортогональными световыми пучками, а именно происходит изменение фазового расстояния между ними. При линейном поступательном движении на выходе интерферометра будет сформирован гармонический сигнал. Значение величины его частоты определяет скорость движения объекта, и, соответственно, указывает на величину смещения объекта относительно его первоначального положения. Так, например, частоте сигнала в 1 Гц соответствует скорость смещения на величину  $\lambda/2$  ( $\lambda$  – длина волны света) в секунду. В качестве измерительного оборудования здесь можно использовать частотомер или счетчик импульсов.

Динамический диапазон измерений величины смещения определяется длиной когерентности используемого лазерного излучения. Точность измерения данного метода определяется как длиной световой волны, так и разрешающей способностью частотомера. Достоинством данного метода является простота используемого измерительного оборудования.

Экспериментальные и расчетные исследования макета рассмотренного выше интерферометра показали, что его точность составляла порядка  $0,1\lambda$  в широком диапазоне линейных перемещений, определяемом длиной когерентности используемого источника излучения.

### Виброустойчивый одноканальный интерферометр с фазовым модулятором

Функциональная схема одноканального виброустойчивого интерферометра с фазовым модулятором представлена на рис. 3.

Устройство содержит последовательно оптически связанные анализатор поляризации излучения 1, фазовый электрооптический модулятор 2, светоделитель 3, выполненный в виде развернутых друг относительно друга под углом  $90^\circ$  первого 4 и второго 5 одинаковых двулучепреломляющих кристаллов. Устройство так же содержит первый 6 и второй 7 отражатели, блок управляющего напряжения фазового электрооптического модулятора 8, который последовательно электрически связан с измерительным устройством 10 и фотоприемником 9, оптически связанным со вторым выходом анализатора поляризации излучения. Оси наведенной анизотропии фазового электрооптического модулятора ориентированы параллельно плоскостям, в которых лежат оптические оси двулучепреломляющих кристаллов светоделителя, и под углом  $45^\circ$  относительно главной оси анализатора поляризации излучения.

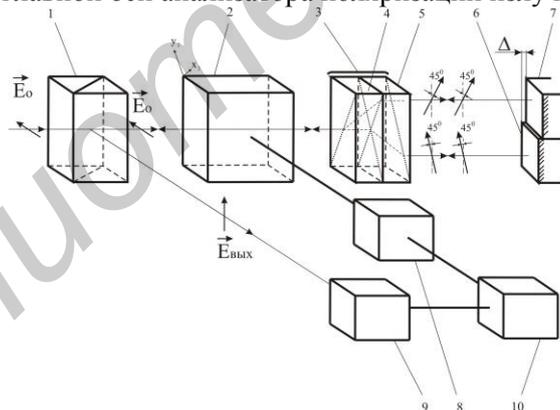


Рис. 3. Оптическая схема виброустойчивого одноканального интерферометра с фазовым модулятором

Виброустойчивый одноканальный интерферометр с фазовым модулятором работает следующим образом.

В исходном состоянии плоско поляризованный в горизонтальной плоскости входной световой пучок с длиной волны  $\lambda$ , пройдя анализатор поляризации излучения, фазовый электрооптический модулятор поступает на вход светоделителя, где происходит его расщепление на два ортогонально поляризованных световых пучка равной интенсивности.

Один световой пучок отражается от первого отражателя, а второй – от второго. После чего они идут в обратном направлении, приобретая при этом оптическую разность хода, равную  $2\Delta_0$ , где  $\Delta_0$  – начальное смещение друг относительно друга первого и второго отражателей. В обратном ходе они объединяются на выходе светоделителя и интерферируют между собой, что приводит вследствие наличия оптической разности хода  $2\Delta_0$  к изменению поляризации излучения, которое, пройдя фазовый электрооптический модулятор, поступает на анализатор по-

ляризации излучения. Он направляет излучение, поляризованное в вертикальной плоскости, идущее в обратном ходе на фотоприемник.

С блока управляющего напряжения на фазовый электрооптический модулятор подается управляющее напряжение  $U(t)$ , позволяющее менять разность фаз  $\Gamma(t)$  ортогонально поляризованных составляющих световой волны, в диапазоне от 0 до  $\pi$ , а в измерительное устройство, подается сигнал начала измерения. При подаче на фазовый электрооптический модулятор управляющего напряжения  $U(t)$  происходит изменение показателя преломления вдоль кристаллофизических осей  $x_2, y_2$ :

$$\begin{cases} n_{x_2}(t) = n_0 + \frac{1}{2} n_0^3 r_{63} \frac{U(t)}{d}; \\ n_{y_2}(t) = n_0 - \frac{1}{2} n_0^3 r_{63} \frac{U(t)}{d}; \end{cases} \quad (3)$$

где  $n_0$  – показатель преломления обыкновенной волны в электрооптическом материале,  $U$  – приложенное управляющее напряжение,  $d$  – расстояние между управляющими электродами,  $r_{63}$  – электрооптический коэффициент. Изменение показателя преломления  $\Delta n(t) = n_{x_2}(t) - n_{y_2}(t)$ ; приводит к появлению разности фаз между ортогонально поляризованными составляющими вектора напряженности электрического поля световой волны, параллельными плоскостям, в которых лежат оптические оси первого и второго двулучепреломляющих кристаллов светоделиителя. Зависимость наводимой фазовым модулятором разности фаз  $\Gamma(t)$  от величины управляющего напряжения  $U(t)$  линейная. Она имеет вид

$$\Gamma(t) = \frac{2\pi}{\lambda} n_0^3 r_{63} U(t). \quad (4)$$

Плоско поляризованный в горизонтальной плоскости входной световой пучок, в прямом ходе, пройдя анализатор поляризации излучения, поступает на вход фазового модулятора. Его оси наведенной анизотропии показателя преломления  $x_2, y_2$  повернуты в плоскости перпендикулярной направлению распространения излучения относительно плоскости поляризации входного светового пучка на угол  $45^\circ$ . После двулучепреломления на входной грани фазового модулятора плоско поляризованная световая волна преобразуется в две ортогонально поляризованные составляющие  $E_{x_2}$  и  $E_{y_2}$ . В фазовом модуляторе между ортогонально поляризованными составляющими наводится разность фаз, равная  $\Gamma(t)$ , после чего излучение поступает на вход светоделиителя, где происходит его расщепление на два ортогонально поляризованных световых пучка равной интенсивности. Причем плоскости поляризации этих ортогонально поляризованных световых пучков параллельны осям наведенной анизотропии  $x_2, y_2$  фазового модулятора. Один световой пучок отражается от первого отражателя, а второй – от второго, смещающегося относительно первого отражателя. После чего они идут в обратном направлении, приобретая при этом оптическую разность хода равную  $2\Delta(t)$ . Пройдя светоделиитель, ортогонально поляризованные световые пучки объединяются. Ортогонально поляризованные составляющие световой волны на выходе фазового модулятора в обратном ходе приобретут дополнительно разность фаз равную  $\Gamma(t)$ , что в сумме с предыдущими набегам составит  $\Gamma_{\Sigma}(t) = 2\Gamma(t) + 4\pi\Delta(t)/\lambda$ . Это приводит к изменению поляризации излучения, поступающего на анализатор поляризации излучения в обратном ходе. Анализатор поляризации излучения направляет излучение, поляризованное в вертикальной плоскости, идущее в обратном ходе на фотоприемник. Зависимость величины интенсивности излучения от наведенной разности фаз между ортогональными световыми пучками на выходе интерферометра будет иметь следующий вид:

$$I(t) = 2I_0 \cos^2 \left( \Gamma(t) + \frac{2\pi \cdot \Delta(t)}{\lambda} \right) = I_0 + I_0 \cdot \cos \left( 2\Gamma(t) + \frac{4\pi \cdot \Delta(t)}{\lambda} \right). \quad (5)$$

Графическое отображение нормированного значения мгновенной интенсивности, в зависимости от величины  $\Delta$ , на выходе виброустойчивого модулятора с фазовым модулятором не отличается от графического отображения на выходе выбороустойчивого интерферометра без фазового модулятора.

Для оптической схемы виброустойчивого интерферометра с фазовым модулятором возможно использование метода обработки сигналов с фазовой автоподстройкой. Это метод автоматического регулирования, подстраивающий фазовый модулятор так, чтобы разность фаз между ортогональными световыми пучками на выходе интерферометра была равна постоянному значению (рис. 4).

На фазовый модулятор подается управляющее напряжение  $U(t)$ , позволяющее менять разность фаз  $\Gamma(t)$  ортогонально поляризованных составляющих световой волны, в диапазоне от 0 до  $\pi$ .

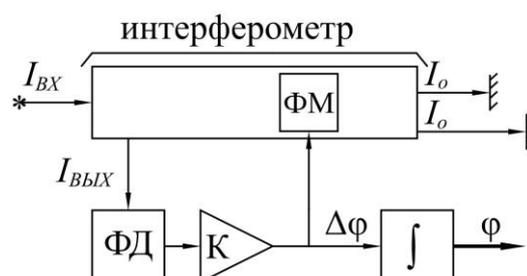


Рис. 4. Условная схема метода фазовой автоподстройки:  
ФД – фотодиод, К – усилитель, ФМ – фазовый модулятор

При условии полного отсутствия изменений в величине фазового сдвига между ортогонально поляризованными пучками происходит калибровка фазового модулятора. Рабочую точку рекомендуется устанавливать на середину квазилинейного участка функции интенсивности.

Если фазовое расстояние между ортогонально поляризованными составляющими световой волны начинает изменяться, то на фазовый модулятор подается соответствующее напряжение, которое возвращает значение величины фазового сдвига в первоначальное положение. Напряжение поступающее на фазовый модулятор  $U(t)$ , пропорционально величине изменения фазового сдвига между ортогональными пучками.

В итоге закон изменения напряжения на выходе усилителя пропорционален  $\Delta(t)$  :

$$\Delta\varphi(t) = K \cdot 2\pi \cdot \frac{\Delta(t)}{\lambda}. \quad (6)$$

Для получения закона фазового расстояния  $\varphi(t)$  необходимо далее поставить накопитель [2, 3].

### Заключение

Предлагается метод трансляции световых потоков на базе двулучепреломляющих элементов и поляризационных преобразованиях, который позволяет исключить влияние дестабилизирующих воздействий за счет того, что в предлагаемом интерферометре световые пучки проходят через одни и те же оптические элементы.

Научная новизна полученных результатов заключается в разработке метода трансляции световых потоков на базе двулучепреломляющих элементов и поляризационных преобразованиях для одноканальной виброустойчивой интерферометрии, отличительной особенностью которого является высокая стабильность характеристик. Кроме того, он, в отличие от известных методов, позволяет минимизировать внешние факторы на процесс измерения и получить точность измерения линейных перемещений порядка  $0,1\lambda$  ( $\lambda$  – длина волны света) в широком диапазоне линейных перемещений, определяемом длиной когерентности используемого источника излучения. Практическая новизна полученных результатов заключается в том, что на основе предложенного метода могут быть созданы виброустойчивые интерферометры, обладающие точностью измерения линейных перемещений более высокой, чем существующие.

## SHAKE-PROOF ONE-CHANNEL INTERFEROMETER

A.I. KONOIKO, R.G. SEDNIOU, A.M. POLIKANIN

### Abstract

A method of transmission light beams based on birefringent elements and polarization transformations which eliminates the effect of destabilizing factors due to the fact that the interferometer is proposed to support and probing light beams pass through the same optical elements is proposed.

### Список литературы

1. *Binnig G., Quate C. F., Gerber Ch.* // Physical Review Letters. 1986. Vol. 56. P. 930–936.
2. *Конойко А.И., Малевич Н.А., Поликанин А.М., Седнев Р.Г.* Виброустойчивый интoрферoметр / Патент РБ № 14118
3. *Конойко А.И., Малевич Н.А., Поликанин А.М., Седнев Р.Г.* Виброустойчивый интoрферoметр / Патент РФ № 2406971

Библиотека БГУИР