

УДК 534.854

С.А. ДАРЗНЕК, Ж. ЖЕЛКОБАЕВ, В.В. КАЛЕНДИН, Ю.А. НОВИКОВ

**ЛАЗЕРНЫЙ ИНТЕРФЕРОМЕТРИЧЕСКИЙ ИЗМЕРИТЕЛЬ  
НАНОПЕРЕМЕЩЕНИЙ****1. Введение**

Одной из важнейших задач развития нанотехнологии и nanoиндустрии является разработка высокочувствительных методов и создание нового поколения высокоточных средств измерений линейных размеров и суперпрецизионных перемещений объектов в нанометровом диапазоне с предельно достижимой степенью точности, а также методов и средств их калибровки.

Измерение сверхмалых перемещений необходимо для проведения фундаментальных и прикладных работ, связанных с созданием нового поколения средств измерений, основанных на принципах растровой электронной и сканирующей зондовой микроскопии, при исследовании квантово-размерных эффектов, аттестации и калибровки систем сканирования и позиционирования микро- и нанодиапазонов и их метрологического обеспечения.

Одним из перспективных решений этой проблемы является создание и внедрение в практику линейных измерений методов и средств лазерной интерферометрии-фазометрии, опирающихся на фундаментальные константы и эталоны физических величин [1, 2].

Уровень современных требований, налагаемых на методы и средства, решающие задачи измерения в нанодиапазоне, можно свести к получению:

- 1) максимально достижимой разрешающей способности измерительной системы;
- 2) максимальной достоверности получаемой измерительной информации;
- 3) максимального быстродействия измерительной системы;
- 4) удобного алгоритма съема, хранения, анализа и передачи измерительной информации;
- 5) заданного метрологического уровня;
- 6) обеспечению стабильности самой измеряемой информации.

Совокупный анализ этих позиций при выбранном методе получения измерительной информации позволяют сформулировать основные требования к

отдельным узлам и устройствам, входящим в измерительную систему. Это касается в первую очередь характеристик источника оптического излучения, оптической схемы, системы съема, обработки и хранения измерительной информации.

Фазовые методы в оптике используются для измерений пространственно-временных изменений величины разности фаз — угла фазового сдвига (УФС) в интерференционном поле между измерительным и опорным пучками, обусловленных частотной, пространственной или поляризационной дисперсией излучения в фазовом объекте [3].

Оптическая (лазерная) интерферометрия совместно с высокоразвитой техникой фазометрии радиодиапазона [4] дает возможность создать высокоточные измерительные системы и заложить основы для обеспечения единства линейных измерений в микрометровом и нанометровом диапазонах.

Для создания измерителей сверхмалых линейных перемещений выбран гетеродинный способ измерений с двухчастотным преобразованием частоты лазерного излучения с помощью акустооптического эффекта и фазовой обработкой измерительной информации в радиочастотном диапазоне. Полученная информация при этом выражается через длину волны излучения или непосредственно с ней связанной величиной, называемой углом фазового сдвига [5].

Практика создания измерителей УФС оптического диапазона (оптических фазометров) показывает, что чувствительность, погрешность и диапазон измерений в общем случае зависят от качества источника излучения, конкретной схемы интерферометра (его конструкторской реализации), алгоритма приема, обработки, хранения и передачи измеренной информации.

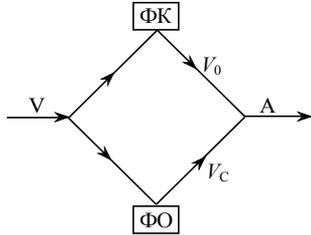
Разработанные и созданные измерители сверхмалых линейных наноперемещений максимально учитывают перечисленные выше требования, обеспечивая необходимое быстродействие, минимальную погрешность, а также абсолютную привязку к государственному первичному эталону единицы длины и эталонам угла фазового сдвига в радио- и оптическом диапазонах.

## 2. Общая схема фазовых измерений

Для измерения разности фаз излучение на входе измерителя обычно делится на два пучка: опорный, минуемый исследуемый объект, и сигнальный, отслеживающий перемещение объекта. После взаимодействия с фазовым (исследуемым) объектом сигнальный пучок тем или иным способом совмещается с опорным. Локальная интенсивность результирующего интерференционного поля этих пучков зависит от относительной ориентации и характера фазовых поверхностей в опорном и сигнальном пучках и, следовательно, несет информацию об оптических или связанных с ними свойствах фазового объекта.

Для описания поля излучения используется комплексный вид сигнала [6]

$$V(r,t) = a(r,t)\exp[i\varphi(r,t)]. \quad (1)$$



**Рис. 1.** Измерение фазового сдвига методом компенсации: ФК — фазовый компенсатор, ФО — фазовый объект, V — область разделения входного оптического пучка, A — область совмещения оптических пучков

Квазимонохроматичности несущей соответствует медленное по сравнению с  $\exp[i(\omega_0 t - k_0 r)]$ , изменение амплитуды  $a(r, t)$  и фазы  $\varphi(r, t)$  в пространстве и времени ( $\omega_0$  — центральная частота несущей,  $k_0$  — волновой вектор в случае плоской волны). В частности, эти изменения могут быть вызваны полезной или паразитной модуляцией излучения, амплитудной, частотной или фазовой. Для более сложных волновых фронтов (сферического, цилиндрического и т.п.) также можно выделить центральное значение пространственного параметра, соответствующего волновому вектору. Описанная выше общая схема фазовых измерений изображена на рис. 1.

В точке наблюдения A интенсивность определяется квадратом модуля суммы сигналов

$$I(r, t) = \left\{ |V_0|^2 + |V_c|^2 + 2\text{Re}(V_0 V_c) \right\} = a_0^2(r, t) + a_c^2(r, t) + 2a_0(r, t)a_c(r, t)\cos[\varphi_0(r, t) - \varphi_c(r, t)] \quad (2)$$

опорного

$$V_0(r, t) = a_0(r, t)\exp[i\varphi_0(r, t)]$$

и сигнального

$$V_c(r, t) = a_c(r, t)\exp[i\varphi_c(r, t)]$$

пучков.

Обычно задачей фазовых измерений является измерение не самой величины  $\varphi_0 - \varphi_c$ , которая содержит не представляющую интерес произвольную функцию координат, а измерение изменений величины  $\varphi_0 - \varphi_c$ , вызванных различного рода процессами в фазовом объекте (ФО). Они могут быть обусловлены изменениями в излучении или исследуемом объекте, которые вследствие частотной, пространственной или поляризационной дисперсии приводят к вариациям величины  $\varphi_0 - \varphi_c$ .

Пусть в отсутствие таких изменений интенсивность интерференционного поля есть  $I^{(0)}(r, t)$ . Интенсивность интерференционного поля при наличии отмеченных выше процессов обозначим  $I(r, t)$ . Очевидно, разность  $\Delta = I - I^{(0)}$  и является источником информации при проведении фазовых измерений. Характер ее зависимости от амплитуд и фаз определяется соотношением (2), которое лежит в основе любого метода фазовых измерений [5]. Например, в простейшем случае плоских, пространственно согласованных пучков (опорного и сигнального), фотоотклик приемника в соответствии с (2) содержит слагаемое, пропорциональное  $\cos \Delta\varphi$ , измерение которого позволяет в принципе найти величину  $\Delta\varphi$ . Фотоприемник по существу является в этом случае фазовым детектором, поэтому способ может быть назван корреляционным.

Введением в опорный (или сигнальный) канал калиброванного фазового компенсатора (ФК) (см. рис. 1) с регулируемым фазовым сдвигом можно добиться максимального или минимального значения локальной интенсивности интерференционного поля. При этом значение измеряемого фазового сдвига можно установить по показанию калиброванного ФК (метод уравнивания).

Регистрация интенсивности может проводиться визуально (компенсационно-визуальный метод), причем достигаемая таким образом точность, очевидно, невелика. Более эффективна фотоэлектрическая регистрация с использованием фазовой модуляции одного из пучков (модуляционно-компенсационный метод). Фотоприемник в этом случае выполняет функцию нуль-индикатора сигнала фотоотклика на частоте модуляции. Чувствительность индикации нуля определяется главным образом точностью калибровки и стабильностью фазового компенсатора.

Непосредственное измерение постоянных сигналов фотоотклика осуществляется в различных технических реализациях так называемого фазового метода. Этот метод наиболее эффективен, когда осуществляется фазовая модуляция одного из пучков. Например, в случае гармонической модуляции в спектре фотосигнала содержатся гармоники частот модуляции, амплитуды которых зависят от постоянного или медленного по сравнению с модуляцией меняющегося фазового сдвига между интерферирующими лучами. Величину фазового сдвига можно определять, измеряя амплитуду той или иной гармоники или отношение амплитуд четных и нечетных гармоник. Таким образом определяют значение  $\operatorname{tg} \Delta\varphi$ , не зависящее от уровня мощности взаимодействующих лучей. Этот метод целесообразно применять для измерения малых фазовых сдвигов при сравнительно низкой относительной точности. Применение метода измерения отношений двух гармоник (как правило, первой и второй) наиболее эффективно при измерении  $\Delta\varphi \approx 1$  рад.

Сдвиг частоты оптической несущей одного или двух пучков одновременно [7–12] приводит к осцилляции интенсивности интерференционного поля в каждой точке с частотой, равной сдвигу частоты несущей, и фазой, равной разности фаз опорного и сигнального пучков. Это следует из выражения (2), если к  $\varphi_0$  или  $\varphi_c$  добавить слагаемое  $\Omega t$  (сдвиг частоты в одном пучке) или  $\Omega_1 t$  и  $\Omega_2 t$  [8, 12] (при сдвиге частоты в обоих пучках), где  $\Omega$  и  $\Omega_{1,2}$  — величины ча-

стотного сдвига ( $\Omega, \Omega_{1,2} \ll \omega_0$ ). Таким образом, фазовый сдвиг сигналов оптического диапазона переносится в радиодиапазон и может быть измерен известными радиотехническими средствами [5]. При этом способе получения информации о фазовом сдвиге фотоприемник исполняет роль смесителя оптического диапазона, поэтому метод называется гомодинным или гетеродинным, если модуляция производится, как в [11].

### 3. Классификация фазовых измерений

Классификацию методов измерений фазовых сдвигов в оптическом диапазоне (используя общие признаки) можно сделать так же, как и при систематизации электрических измерений [13].

Наиболее общим классификационным признаком является способ получения числового значения измеряемой величины. Исходя из этого признака, все методы измерения фазового сдвига разделяются на прямые и косвенные.

Другой признак, который целесообразно использовать при классификации фазовых измерений, — это способ проведения физического эксперимента. По этому признаку методы измерений фазы могут быть разделены на методы непосредственной оценки и методы уравнивания.

Первые предусматривают преобразование измеряемого фазового сдвига в промежуточную величину, например преобразование его в пропорциональный ему фототок, удобный для дальнейших измерений. Методы уравнивания основаны на измерении фазового сдвига путем его компенсации калиброванным фазовым сдвигом.

В дальнейшем классификацию методов фазовых измерений целесообразно проводить, исходя из вида измерительных преобразований. По этому признаку существующие методы можно разделить на корреляционный, включающий в себя модуляционный и фазовый, гомодинный и гетеродинный методы с использованием различных средств для измерений изменения разности фаз в радиодиапазоне [7], а также компенсационные методы: модуляционный и визуальный.

Описанные выше способы извлечения информации о фазовых сдвигах лежат в основе работы различных интерференционных устройств. Чувствительность, точность, разрешающая способность зависят от характеристик конкретного устройства и могут быть улучшены в той или иной мере за счет конструктивных или схемных решений.

Существуют, однако, ограничения более принципиального характера, связанные с квантовой природой излучения, с одной стороны, и так называемыми ограничениями технического предела, с другой стороны. Последние обуславливают флуктуацию и дрейф самой измеряемой величины.

### 4. Принципиальные ограничения интерферометрических измерений

Анализ соотношения (2) для случая плоских волн в опорном и сигнальном канале показывает, что если в одном из интерферирующих пучков происходит

девиация его фазы, представляемая в виде  $\delta\varphi \cos(\Omega t)$ , то переменную составляющую на выходе фотоприемника интерферометра можно записать в виде [8]

$$i_n = \frac{2\eta e(I_0 I_c)^{1/2}}{\hbar\omega_0} \cos[\Delta\varphi + \delta\varphi \cos(\Omega t)], \quad (3)$$

где  $\hbar$  — постоянная Планка,  $\eta$  — квантовая эффективность фотодетектора,  $e$  — заряд электрона,  $I_0$  и  $I_c$  — интенсивность (мощность) опорного и сигнального пучков. Тогда амплитуду первой гармоники частоты модуляции  $\Omega$  можно представить в виде

$$i_1 = 4\eta e(I_0 I_c)^{1/2} \sin(\Delta\varphi) I_1(\delta\varphi) (\hbar\omega_0)^{-1}, \quad (4)$$

где  $I_1$  — функция Бесселя первого порядка.

Из соотношения (4) следует, что обращение  $i_1$  в нуль при  $\Delta\varphi = N\pi$  ( $N=0, 1, 2, \dots$ ) может служить критерием компенсации фазового рассогласования в одном из пучков. Очевидно, что уменьшение  $i$  возможно только до уровня шумов в полосе приема  $\Delta\Omega$  вблизи частоты модуляции  $\Omega$ , и этот уровень, следовательно, будет определять чувствительность фазовых измерений. При небольших величинах падающей на приемник оптической мощности основные источники шума сосредоточены в самом фотодетекторе. Физика шумовых процессов в фотоприемниках и методы оценки среднеквадратичной дисперсии амплитуд фототока описаны в работах [14, 15]. Пока мощность шумов на выходе фотоприемника не зависит или зависит слабо от мощности излучения, то естественно для увеличения чувствительности увеличить падающую на фотодетектор мощность (точнее  $I_0, I_c$ ).

Однако с ростом  $I_0, I_c$  растет и дробовый шум, обусловленный распределением числа фотонов в опорном и сигнальном пучках. Это обстоятельство принципиально ограничивает возможность измерения малых  $i_1$ , и, следовательно, чувствительность фазовых измерений. Из выражения (3) видно, что при заданном уровне постоянной интенсивности на фотоприемнике  $I_0 + I_c$ , величина  $i$  максимальна при  $I_0 = I_c$ , т.е.  $I_0 + I_c = I$ . В этом случае для постоянной составляющей фототока получаем

$$i_0 = 2\eta eI/\hbar\omega_0. \quad (5)$$

Тогда для мощности дробового шума в полосе приема будем иметь

$$i_{\varphi}^2 = ei_0 = (2\eta e^2 I/\hbar\omega_0) \Delta\Omega / 2\pi = 2\eta e^2 I/\hbar\omega_0 \tau, \quad (6)$$

где  $\tau$  — время измерения, эквивалентное полосе приема  $\Delta\Omega$ .

Сравнивая выражения (5) и (3), получим для фазовой чувствительности

$$\Delta\varphi \geq \frac{1}{2} (\hbar\omega_0 / 2I\tau\eta)^{1/2}. \quad (7)$$

Минимизацию соотношения (7) можно получить для когерентных состояний. В наибольшей степени этому состоянию соответствует излучение лазера.

Это обстоятельство, а также большая по сравнению с другими источниками спектральная мощность делают очевидным преимущество использования лазеров в фазометрии.

Пользуясь соотношением (7) и задавая значения  $\eta = 1.0$ ,  $\tau = 1$  с,  $I = 10^{-3}$  Вт, можно оценить, что для  $\lambda = 0.6328$  мкм

$$\Delta\varphi_{\min} \geq 0.9 \cdot 10^{-8} \text{ рад} \approx 10^{-8} \text{ рад.}$$

Выбор мощности  $I = 1$  мВт диктуется тем обстоятельством, что превышение этого уровня выводит фотоприемник (ФП) в режим насыщения, а небольшой динамический диапазон ФП приводит к тому, что при измерении будут превалировать не дробовые шумы, а иные его виды.

Неполное пространственное согласование опорного и сигнального пучков, «конечное» значение их апертур приводит к тому, что нормированная аппаратная функция [16] становится меньше единицы и это условие также огрубляет чувствительность реальных фазометров. Это приводит к тому, что фазовая чувствительность реального интерферометрического устройства на один-два порядка хуже, чем предсказывает соотношение (7). В общем случае, пользуясь соотношением (7), можно оценить достижимый предел чувствительности при модуляционно-компенсационном методе измерений фазового сдвига при том условии, что фазовый компенсатор (ФК) достаточно стабилен, а амплитуда флуктуации на частоте модуляции ниже уровня квантовых флуктуаций фазы излучения.

При гомодинном (гетеродинном) методе фазовых измерений сдвиг фазы оптического диапазона переносится с помощью фотосмещения в радиочастотный диапазон, а поскольку в радиодиапазоне погрешность измерения временных интервалов не хуже  $10^{-10}$  с (метод временных интервалов), то ясно, что погрешность гомодинного и гетеродинного метода в основном лимитируется стабильностью и флуктуациями самой измеряемой величины.

Оценки также показывают, что по сравнению с модуляционно-компенсационным и гомодинным (гетеродинным) методами, корреляционный метод наименее точен. Он используется в основном для измерения малых ( $\Delta\varphi < 1$  рад) фазовых сдвигов с низкой относительной точностью.

Из изложенного выше следует, что модуляционно-компенсационный метод и метод переноса частоты являются наиболее точными и чувствительными при измерении фазовых сдвигов в оптике.

Наряду с квантовыми флуктуациями другой принципиальной причиной, ограничивающей чувствительность и точность фазовых измерений, является флуктуация оптической длины пути, вызываемая самыми разнообразными причинами: температурными вариациями длин плеч интерферометра и показателей преломления оптических элементов, механическими, акустическими и микросейсмическими колебаниями. Оптический путь может быть реализован в вакууме, газе, жидкости или в твердом теле.

Вообще для всех видов оптического пути амплитуда механических вибраций ограничена снизу термодинамическими флуктуациями:

$$K_0 A^2 = kT, \quad (8)$$

где  $K_0$  — эффективная жесткость нормального колебания устройства интерферометра,  $A$  — амплитуда колебания,  $k$  — постоянная Больцмана,  $T$  — температура.

Обычно в (8) вместо  $T$  фигурирует эквивалентная шумовая температура  $T_{ш}$ , характеризующая степень сейсмической и акустической развязок [17]. Как правило, амплитуды механических вибраций с помощью развязок и выбора частоты модуляции (большей  $10^3$ – $10^4$  Гц) могут быть сделаны  $\sim 10^{-15}$ – $10^{-16}$  м, что эквивалентно флуктуации фазы на частоте модуляции  $\sim 10^{-8}$ – $10^{-9}$  рад для  $\lambda = 0.6328$  мкм.

Тепловые флуктуации длины оптического пути (сигнального и опорного) можно оценить из соотношения

$$\left(\Delta l^2\right)^{1/2} = l_0 \alpha \left(\Delta T^2\right)^{1/2} = l_0 \alpha T \frac{\text{ЖКЦ}}{\text{ИСШ}}^{1/2}, \quad (9)$$

где  $l_0$  — длина тракта,  $\alpha$  — коэффициент теплового расширения материала устройства,  $C$  — теплоемкость материала. Оценка девиации фазы при  $l_0 = 10^{-1}$  м,  $\alpha = 10^{-6}$ – $10^{-7}$  (инвар, суперинвар),  $T = 300$  К дает  $(\Delta \varphi^2)^{1/2} \approx (10^{-11}$ – $10^{-12})$  рад для  $\lambda = 0.6328$  мкм.

Из сказанного ясно, что механические, акустические и микросейсмические колебания ограничивают чувствительность и точность фазовых измерений. Эти значения можно улучшить сужением полосы приема, т.е. увеличением времени измерений. Однако при достаточно больших временах измерения вариаций фазового сдвига существенное значение имеет его стабильность.

Температурные изменения, механическая текучесть, старение образцов, изменение состояния окружающей среды приводят к изменению длины оптического пути, т.е. к дрейфу фазового сдвига. Поскольку дрейф фазы вызывается целым рядом неконтролируемых причин, то оценка скорости дрейфа — практически не решаемая задача. Поэтому для введения поправок используют результаты долговременных измерений дрейфа.

Из анализа, проведенного выше, следует, что с учетом большого класса шумов, используя лазерные интерферометры, можно измерять фазовые сдвиги на уровне  $10^{-3}$  градуса фазы на длине волны  $\lambda = 0.6328$  мкм, что эквивалентно линейному смещению  $\sim 0.1$  нм.

## 5. Фазовые компенсаторы и методы их калибровки

Важной задачей в области фазовых измерений оптического диапазона является разработка и создание фазовых компенсаторов, а также методов их калибровки. Погрешность измерения фазовых сдвигов при использовании компенсационно-модуляционного способа определяется в основном точностью калибровки и стабильностью фазовых компенсаторов.

### 5.1. Фазовые компенсаторы

В интерферометрии наибольшее распространение получили компенсаторы пластинчатого типа [17]; компенсаторы, основанные на изменении давления воздуха [18]; электромеханические компенсаторы, в частности пьезокерамические [19]. Погрешность калибровки фазовых компенсаторов даже при сравнительно малом диапазоне ( $\Delta\varphi \leq 1$  рад) не превышают  $10^{-2}$ – $10^{-3}$  рад.

Для осуществления компенсации фазового сдвига, как правило, используются следующие физические принципы:

- 1) изменение геометрической длины пути электромагнитного излучения,
- 2) явление электромагнитооптического эффекта в различных средах,
- 3) изменение оптической плотности веществ при изменении его термодинамических параметров ( $P, V, T$ ).

Простейшие типы фазовых компенсаторов представляют собой зеркала и оптические клинья, перемещением которых можно изменять длину оптического пути. Перемещение может осуществляться как механически (микрометрическими головками), так и электромеханически (с помощью пьезоэлементов той или иной конструкции). Точность перемещения механических конструкций ограничивается люфтами и составляет несколько микрометров, поэтому такого типа компенсаторы предпочтительно применять для измерения больших разностей хода  $\sim 2\pi N$  с погрешностью  $\sim \lambda/10$ – $\lambda/100$ . Фазовые компенсаторы, использующие перемещение фазового объекта, обладают высокой воспроизводимостью результатов отработки фазовых сдвигов, однако имеют малое быстродействие  $\sim 1$  с.

Точность перемещения зеркал с помощью пьезоэлементов лимитируется главным образом погрешностью установки управляющего напряжения, составляющей величину  $\sim 10^{-5}$ – $10^{-6}$  В. Однако компенсаторы на пьезоэлементах обладают другими недостатками, к числу которых относятся гистерезис и дрейф пьезомодулей  $d_{ij}$ . Например, для керамики типа ЦТС-19 гистерезис на низких частотах (0–10 Гц) составляет 10% от максимального смещения. Эта цифра типична для большинства видов пьезокерамики. Наличие дрейфа пьезомодулей вызывает необходимость повторных калибровок. Значительное быстродействие ( $\sim 1$  мс) таких ФК и возможность управления электрическим напряжением позволяет автоматизировать процесс фазовых измерений.

Хорошо известны фазовые модуляторы, работающие на использовании электрооптических и магнитооптических эффектов. К ним относятся модуляторы на эффекте Котон–Муттона, Фарадея, Керра [9]. Их принцип действия основан на двойном лучепреломлении в веществе, помещенном во внешнее электрическое или магнитное поле. Естественно, что такого типа модуляторы могут использоваться и в качестве фазовых компенсаторов при условии их надежной и точной калибровки. Электрооптические модуляторы отличаются быстродействием и широким диапазоном компенсируемых фазовых сдвигов. Применение этих модуляторов для компенсации фазовых сдвигов ограничивается необходимостью достаточно высоких напряжений и трудностями получения кристаллов с заранее заданными и воспроизводимыми свойствами.

В качестве фазовых компенсаторов можно также использовать газовые кюветы с управляемым давлением. Изменение фазового сдвига в этом случае происходит по двум причинам:

- 1) изменяется концентрация газа и, следовательно, его показатель преломления;
  - 2) при изменении давления изменяются параметры формы линий поглощения.
- Например, для коэффициента поглощения  $\alpha(\nu)$  линии лоренцевской формы

$$\alpha(\nu) = \alpha(\nu_0) \Delta \nu^2 / \left( \frac{\gamma}{\nu} (\nu - \nu_0)^2 + \Delta \nu^2 \frac{\text{Ш}}{\text{Л}} \right) \quad (10)$$

в области давлений  $10^{-2} - 10^2$  Тор полуширина линии поглощения  $\Delta \nu$  пропорциональна давлению.

Величина фазового сдвига  $\varphi$  для кюветы длиной  $L$  составляет

$$\varphi = \alpha(\nu_0) L / 2 \left( (\nu - \nu_0) / \Delta \nu \right) \left\{ 1 + \left( (\nu - \nu_0) / \Delta \nu \right)^2 \right\}^{-1}. \quad (11)$$

При работе в области прозрачности  $(\nu - \nu_0) \gg \Delta \nu$  выражение (11) упрощается:

$$\Delta \varphi = \alpha(\nu_0) L / 2 \left( \Delta \nu / (\nu - \nu_0) \right). \quad (12)$$

Для типичного значения  $\Delta \nu = 3 \cdot 10^7$  Гц/Тор изменение фазового сдвига составляет величину  $\Delta \varphi \approx 0.35$  рад при изменении давления до 50 Тор. Большие значения фазовых сдвигов можно получить при работе с более высокими давлениями — примерно нескольких атмосфер. Однако для таких давлений форма линии поглощения становится сложнее и связь между поглощением и дисперсией оценить затруднительно. Отсюда ясно, что использование пневматических компенсаторов бесперспективно ввиду нетехнологичности их изготовления и неудобства эксплуатации, в первую очередь связанной с поддержанием с высокой точностью температуры и давления газа, определяющих погрешность установки фазовых сдвигов.

## 5.2. Методы калибровки фазовых компенсаторов

Наиболее употребительными фазовыми компенсаторами являются компенсаторы видимого диапазона, изготовленные из материала с известным коэффициентом преломления. Компенсатор представляет собой тонкую пластину с заданным углом клиновидности, как правило, не превышающим  $3^\circ$ . На практике компенсаторы изготавливаются из материала с достаточно широким спектральным диапазоном пропускания от видимого до среднего инфракрасного диапазона. Это позволяет легко пересчитывать компенсируемые фазовые сдвиги при изменении используемой длины волны излучения. При этом переход с меньшей длины волны к большей позволяет повысить точность калибровки.

Нами производилась калибровка клиновидных (механических) и пьезокерамических (электромеханических) фазовых компенсаторов. В качестве механических ФК использовались оптический клин, изготовленный из  $\text{BaF}_2$  с уг-

лом при вершине  $2.5^\circ$ , который перемещался с помощью микрометрического винта, а также две плоскопараллельные пластины, поворачивающиеся на углы  $\pm \alpha$  относительно плоскости, перпендикулярной лучу. В случае клина длина оптического пути меняется согласно соотношению

$$\Delta \varphi \approx 2\pi \lambda^{-1} (n - 1) x \operatorname{tg} \varphi, \quad (13)$$

где  $n$  — показатель преломления материала клина,  $\varphi$  — угол при вершине клина,  $x$  — величина перемещения клина поперек падающего пучка излучения.

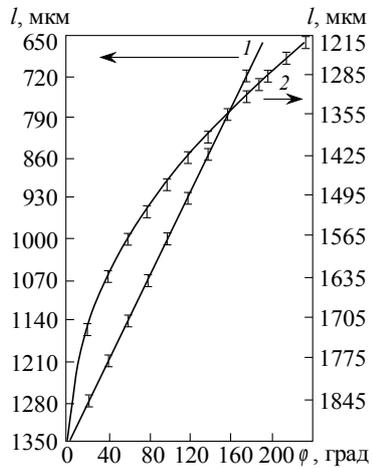
В случае поворота пластины длина оптического пути изменяется согласно соотношению

$$\Delta \varphi \approx 4\pi d / \lambda \left( \sqrt{n^2 - \sin^2 \alpha} - \cos \alpha \right), \quad (14)$$

где  $d$  — толщина пластины.

Калибровка механических ФК производилась с использованием гелий-неонового лазера с длиной волны  $0.6329 \mu\text{м}$  (ЛГН-302). Опорными точками калибровки компенсатора являются фазовые сдвиги  $\pi N/2$  и  $\pi N$ , которые фиксировались по минимальным и максимальным значениям амплитуд сигналов на первой

и второй гармониках частоты модуляции, осуществляемой колебаниями зеркала, укрепленного на пьезокерамике. Суммарная погрешность калибровки компенсатора  $\delta\varphi$  определяется главным образом точностью механических перемещений используемой конструкции ФК и составила величину  $\sim 0.5$  градуса фазы. Экспериментальные результаты хорошо согласуются с расчетными данными. На рис. 2 приведены градуировочные кривые для двух типов механических ФК: кривая 1 для фиксированного угла (оптический клин), а кривая 2 для переменного угла (плоскопараллельные пластины).



**Рис. 2.** Градуировочные двух типов фазовых компенсаторов: оптического клина *1* и плоскопараллельных пластин *2*

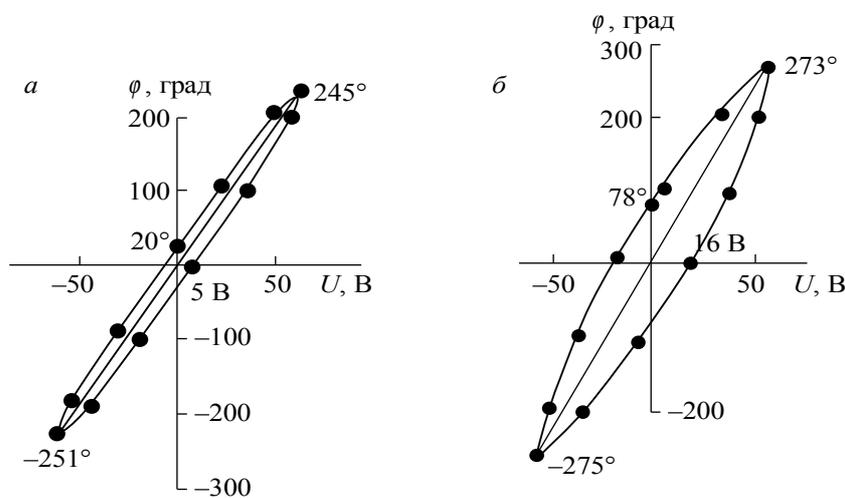
Из сравнения кривых *1* и *2* видно, что изменение фазы, вызванное перемещением оптического излучения оптического клина, линейно зависит от его перемещения. Поэтому при значительном динамическом диапазоне использование клина предпочтительнее. Однако при динамическом диапазоне ~20 градусов фазы излучения нелинейность фазовой характеристики поворотных пластин незначительна, в то время как точность отсчета фазовых сдвигов значительно выше.

Образцы пьезокерамики ЦТС-19, используемые как фазовые компенсаторы, представляют собой трубки диаметром 18 мм, длиной 27 мм и толщиной стенки 1.5 мм. Зеркало крепят к торцу пьезокерамики и закрепляют на юстировочной головке. Фазовый сдвиг модулированного по фазе излучения с длиной волны  $\lambda$ , отраженного от зеркала под углом  $\alpha$ , равен

$$\Delta \varphi = \frac{4\pi}{\lambda} \Delta n x \cos \alpha ,$$

где  $n$  — показатель преломления среды, в которой распространяется излучение,  $\Delta x = KU$  — смещение зеркала,  $U$  — напряжение на пьезокерамике,  $K$  — коэффициент пропорциональности, зависящий от формы, размеров образца и величин соответствующего пьезомодуля.

Экспериментальные исследования электромеханических свойств пьезокерамики проводились на интерферометре типа Маха–Цендера с использованием в качестве источника излучения гелий-неонового лазера. Для повышения чувствительности и стабильности интерферометра применялась система термоакустической развязки, обеспечивающая минимизацию дрейфа и флуктуации фазы до уровня ~2° фазы в минуту для излучения с  $\lambda = 0.6328$  мкм.



**Рис. 3.** Зависимость изменения фазовых сдвигов от величины приложенного к пьезокерамике напряжения смещения для двух типов механических фазовых компенсаторов: оптического клина (*a*) и плоскопараллельных пластин (*б*)

На рис. 3 показаны зависимости изменения фазовых сдвигов (в градусах фазы) для двух типов фазовых компенсаторов на основе оптического клина (рис. 3*a*) и плоскопараллельных пластин (рис. 3*б*) для  $\lambda = 0.6328 \text{ мкм}$  от величины напряжения смещения, приложенного к образцам пьезокерамики. Общим недостатком всех исследуемых элементов является значительное последствие, обусловленное релаксационными процессами в пьезокерамике, а также гистерезис. Значение удлинения последствия, измеренное для всех элементов с использованием интерферометра Линника, составляло после трехминутной выдержки 2–7 % от общего удлинения. Дальнейшее удлинение не превышало 1 %, а через 30 мин — 0.2 %, что совпадало с данными, приведенными в работе [19]. Кроме того, следует отметить, что при смене полярности напряжения на пьезокерамике удлинение последствия возрастало в 2–3 раза по сравнению с однополярным режимом работы. При этом величина гистерезиса возрастает с увеличением частоты прилагаемого к пьезокерамике напряжения. Так, в диапазоне частот от 0.1 до 100 Гц величина гистерезиса может составлять значения  $\sim 10\%$ , а на частоте 1 кГц достигает 25 %.

Сравнение удлинения пьезокерамики с интервалом времени в 3 месяца при одинаковых прочих условиях показало, что оно уменьшалось на 5.5 % и обусловлено ее «старением». Таким образом, исследования электромеханических свойств пьезокерамики показали, что характеристики пьезокерамического ФК (точность, динамический диапазон, быстродействие) являются конкурирующими. При увеличении динамического диапазона растет относительная величина гистерезиса и, следовательно, погрешность обработки. Увеличение быстродействия связано с работой на больших частотах, следовательно, с большим гистерезисом, т.е. с низкой точностью. На-

конец, на больших частотах снижается пьезомодуль, т.е. уменьшается динамический диапазон. Петля гистерезиса ограничивает точность измерения фазового сдвига при любом (быстром или медленном) способе компенсации с использованием такого рода фазовых компенсаторов.

Достижимую точность можно оценить как полуширину петли гистерезиса по смещению, которая уменьшается с уменьшением максимального смещения. Поэтому отработка с малым динамическим диапазоном будет более точной. Кроме того, при отработке постоянных или медленно меняющихся фазовых сдвигов имеется возможность работы на одной ветви петли гистерезиса, что позволяет увеличить точность измерения фазовых сдвигов. Для увеличения динамического диапазона с сохранением малой погрешности необходимо либо увеличивать длину или количество пьезоэлементов, либо увеличивать фазовый сдвиг за счет многократных отражений от зеркала. Старение пьезокерамики означает необходимость повторной калибровки, причем интервалы между ними будут возрастать с течением времени.

Калибровка электро- и магнитооптических фазовых компенсаторов, также как и газовых с управляемым давлением, в настоящее время может быть проведена только сравнением с механическими и пьезокерамическими ФК. Поскольку последние являются сравнительно инерционными (время отработки 1 мс), калибровку электро- и магнитооптических компенсаторов с их помощью можно провести лишь на низких частотах с точностью порядка 0.01 градуса фазы. В то же время электро- и магнитооптические модуляторы выгодно отличаются быстродействием, так что использование их в качестве фазовых компенсаторов позволило бы существенно сократить время измерений фазовых сдвигов компенсационно-модуляционным методом. Однако это приводит к потере точности измерений по сравнению с механическими фазовыми компенсаторами.

Калибровку фазовых компенсаторов на электро- и магнитооптических эффектах в области высоких частот можно в принципе осуществить с использованием гомодинного метода измерения фазовых сдвигов [9]. Точность калибровки в данном случае определяется, с одной стороны, шириной спектра оптического излучения, а с другой — абсолютной погрешностью измерения интервалов времени в радиодиапазоне, и для оптического диапазона оценивается величиной  $\sim 0.01$  градуса фазы.

Важнейшей задачей метрологического обеспечения фазовых измерений в оптическом диапазоне является создание эталонных мер угла фазового сдвига в полосе частот 30–100 МГц, обеспечивающих калибровку лазерных интерферометров-фазометров с точностью 0.01–0.1° при разрешающей способности 0.005°.

Рассмотрим работу лазерной измерительной системы — радиооптического фазового компаратора, предназначенной для задания, регулирования и измерения с высокой точностью угла фазового сдвига (УФС) между двумя интерферирующими пучками.

Принцип действия радиооптического фазового измерительного компаратора основан на использовании гетеродинного метода детектирования оптиче-

ских полей после акустооптического взаимодействия с привязкой к единому эталону частоты, времени и длины, что обеспечивает воспроизведение и передачу размера единицы угла фазового сдвига из оптического диапазона в радиодиапазон и обратно без существенных погрешностей (радиооптический фазовый мост). Применение в составе фазового компаратора следящего высокоточного фазометра позволяет создать замкнутое «фазовое кольцо» по электрическому сигналу радиочастоты и обеспечивает прецизионное измерение, задание и регулирование угла фазового сдвига как в радио- (с использованием управляемого калибратора фазы), так и в оптическом диапазоне путем модуляции радиочастотным сигналом проходящего через акустооптический модулятор непрерывного лазерного излучения He–Ne-лазера. При этом материализованной мерой угла фазового сдвига в оптическом диапазоне служит акустооптический модулятор.

Исследование метрологических характеристик радиооптического фазового компаратора показали, что СКО результатов измерений УФС в оптическом диапазоне составляет  $0.05^\circ$ , что соответствует погрешности измерений длины менее 0.1 нм.

## **6. Измеритель сверхмалых линейных перемещений**

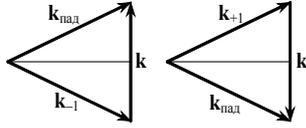
### **6.1. Выбор и обоснование схемы измерений наносмещений**

При выборе схемы измерений в нанодиапазоне исходили из следующих требований:

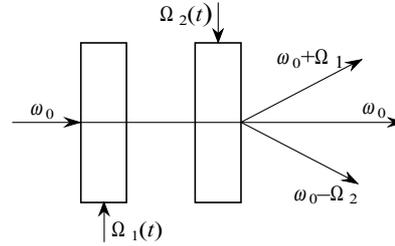
- 1) обеспечение измерений линейных перемещений в диапазоне 1 нм – 10 мм;
- 2) дискретность отсчета 0.1 нм;
- 3) обеспечение СКО результата калибровки не более 0.1 нм;
- 4) максимальное значение измеряемой скорости перемещений объекта 3 мм/с;
- 5) обеспечение высокой помехозащищенности.

С целью обеспечения максимальной чувствительности и быстродействия была реализована схема измерений на основе двухчастотного лазерного гетеродинного интерферометра с переносом частоты измерительного сигнала в радиодиапазон. Оптическая схема измерений была реализована на основе двухлучевой интерференции с использованием модифицированного интерферометра типа Майкельсона. В этом случае в качестве делительной пластины используются два последовательно установленных акустооптических модулятора. Они выполняют функции как управляемых делителей входного оптического излучения, так и модулирующих элементов.

Известно [9–12], что при распространении ультразвуковых волн в конденсированных средах образуется высокочастотная пространственная фазовая решетка и при попадании на эту решетку свет испытывает дифракцию. При некоторых условиях (называемых условиями Брэгга) от падающего света выделяется единственный дифракционный пучок излучения. Величина углового отклонения пучка определяется из соотношения



**Рис. 4.** Векторная диаграмма взаимодействия света и звука в области Брэгга со смещением частоты «вниз» (а) и «вверх» (б)



**Рис. 5.** Режим «встречного» включения АОМ

$$\sin \theta_{\text{Б}} = \frac{\lambda}{2\Lambda}, \quad (15)$$

где  $\lambda$  — длина волны падающего излучения,  $\Lambda$  — длина акустической волны,  $\theta_{\text{Б}}$  — угол Брэгга.

На рис. 4 представлена векторная диаграмма, иллюстрирующая закон сохранения импульса при взаимодействии фотона и фонона, из которого следуют условия дифракции Брэгга [10]. Отсюда можно записать

$$\sin \theta_{\text{Б}} = \frac{1}{2} \frac{K}{k} = \frac{1}{2} \frac{\lambda}{\Lambda}, \quad (16)$$

где  $K$  — волновой вектор звуковой волны,  $k$  — волновой вектор световой волны.

В измерительной установке реализован вариант, схематически представленный на рис. 5, с использованием двух акустооптических модуляторов (АОМ) ( $\omega_0$  — частота падающей на АОМ световой волны, а  $\Omega_1(t)$  и  $\Omega_2(t)$  — частоты ультразвуковых волн, подаваемых на модуляторы). В этом случае акустооптические модуляторы работают в так называемом встречном режиме включения, при котором из фотоприемника-смесителя удобнее всего выделять информационный сигнал. При такой схеме включения сдвинутые пучки излучения носят названия плюс (+) и минус (–) первого порядка дифракции.

Для получения минус первого порядка дифракции один из акустооптических модуляторов должен быть повернут на  $\theta_{\text{Б}}$  по часовой стрелке, а для получения плюс первого порядка второй акустооптический модулятор должен быть повернут на  $\theta_{\text{Б}}$  против часовой стрелки.

Выбранная оптическая схема измерительной системы достаточно проста для конструктивной реализации и мобильна для переналадки при работе с различными объектами исследований.

## 6.2. Структурная схема и состав измерителя сверхмалых перемещений

Структурная схема измерителя наноперемещений приведена на рис. 6. Измеритель включает в себя:

- 1) источник когерентного оптического излучения;
- 2) оптико-механический блок (ОМБ), содержащий акустооптические ячейки;
- 3) систему детектирования оптического излучения — фотоприемное устройство (ФПУ);
- 4) систему сбора и обработки информации — электронно-фазометрическая система (ЭФС);
- 5) систему источников высокочастотных напряжений, подключенных к АОМ, — генераторный блок высокой частоты (ГБ).

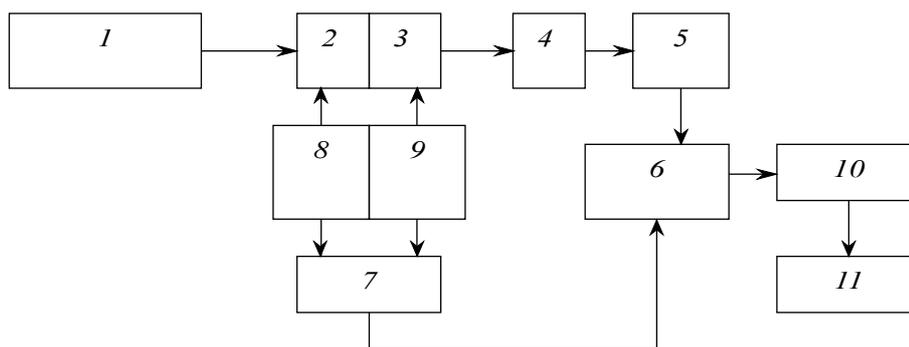
Измеритель наноперемещений содержит одночастотный стабилизированный He–Ne-лазер, оптически связанный последовательно с АОМ1 и АОМ2, ориентированными под углом Брэгга  $\theta_{\lambda}$ , электрические входы которых через калибратор фазы (КФВ) подключены к генераторным блокам (8 и 9), осуществляющим модуляцию высокочастотным сигналом непрерывного лазерного излучения, проходящего через акустооптические модуляторы. Выход АОМ2 оптически связан с интерферометром, который обеспечивает совмещение интерферирующих световых пучков в плоскости фоточувствительного слоя фотоприемника, на выходе которого выделяется электрический сигнал разностной частоты. В измерительном канале интерферометра установлен калиброванный задатчик наноперемещений, управляемый от функционального генератора. Генераторный блок связан электрически с помощью системы фазовой автоподстройки частоты (ФАПЧ) с опорным входом высокоточного цифрового следящего фазометра, другой измерительный вход которого подключен к фотоприемному устройству (ФПУ) для выделения информационного сигнала. Выход фазометра сопряжен с компьютером для последующей обработки результатов измерений.

В основу работы измерительной системы (ИС) положено сравнение измеряемого изменения длины оптического пути с высокостабильной мерой — длиной волны излучения частотно-стабилизированного He–Ne-лазера. Сравнение осуществляется при помощи двухлучевого лазерного гетеродинного интерферометра, в котором производится преобразование и модуляция оптического излучения, формирование опорного и измерительного каналов и последующее совмещение излучения на смесительном элементе. Преобразование частоты излучения стабилизированного одночастотного He–Ne-лазера осуществляется с использованием акустооптических модуляторов. Последующее выделение информационного сигнала осуществляется на разностной радиочастоте в фотоприёмном устройстве. Обработка полученной информации производится в специализированной электронно-фазометрической системе.

Измерение проводится относительно сигнала разностной частоты и опорного сигнала той же радиочастоты, формируемого в ЭФС, сопряженной с персональным компьютером.

Измеритель сверхмалых линейных перемещений обеспечивает работу в режиме измерений перемещений в реальном масштабе времени путем счета фазовых циклов ( $2\pi N$ , где  $N$  — целое число циклов) и дробных долей полос интерференции (в диапазоне  $0-2\pi$ ) так называемых углов фазового сдвига, нормируемых в долях или единицах длины волны стабилизированного одночастотного He–Ne-лазера. Базовое программное обеспечение позволяет в режиме диалога осуществлять сбор измерительных данных, их обработку и представление в виде, удобном для пользования.

В фазометре происходит сравнение по фазе сигнала разностной частоты  $\Omega(\Delta\varphi_{\text{изм}})$ , несущего информацию об измеряемом линейном перемещении объекта, и опорного сигнала от смесителя  $\Delta\varphi_{\text{оп}}$  частоты  $\Omega$ . Результат измерений перемещений  $\Delta L(t)$  вычисляется по формуле



**Рис. 6.** Структурная схема измерителя сверхмалых перемещений: 1 — стабилизированный He–Ne-лазер; 2, 3 — группа акустооптических модуляторов; 4 — интерферометр двухчастотный; 5 — фотоприемное устройство; 6 — система приема и предварительной обработки информации; 7 — смеситель частот; 8, 9 — блок высокочастотных генераторов; 10 — персональный компьютер; 11 — принтер

$$\Delta L(t) = (\lambda / 4\pi) (2\pi N + \Delta \varphi_{\text{изм}} - \Delta \varphi_{\text{оп}}), \quad (17)$$

где  $\lambda$  — длина волны лазерного излучения,  $t$  — время.

В работе [10] установлены потенциальные пределы скорости счёта фазовых циклов, для оценки которых введен показатель приращения УФС за период опорного сигнала  $\Delta \varphi_{T_{\text{оп}}}$ , определяемый как разность УФС  $\varphi_i$  и  $\varphi_{i-1}$  в соседних периодах опорных сигналов:

$$\Delta \varphi_{T_{\text{оп}}} = \varphi_i - \varphi_{i-1} = 2\pi \int_0^{T_{\text{оп}}} f(t) dt. \quad (18)$$

При  $f_D(t) = f_D = \text{const}$

$$\Delta \varphi_{T_{\text{оп}}} = 2\pi f_D / f_{\text{оп}} = 4\pi V / \lambda f_{\text{оп}}, \quad (19)$$

где  $f_D(t)$  — частота Доплера,  $f_{\text{оп}}(t)$  — частота опорного сигнала с периодом  $T_{\text{оп}}$ ,  $V$  — скорость движения объекта,  $\lambda$  — длина волны лазерного излучения.

Для методов с переносом спектра пределы скорости счёта фазовых циклов асимметричны и равны  $\Delta \varphi_{T_{\text{оп}}} \leq 2\pi$ , для отрицательных  $f_g$ . Алгоритмические методы, восстанавливающие ФЦ по алгоритму  $|\varphi_i - \varphi_{i-1}| \leq 180^\circ$ , имеют предел  $\Delta \varphi_{T_{\text{оп}}} \leq 180^\circ$ , где  $\Delta \varphi_{T_{\text{изм}}}$  — приращение УФС за время измерения  $T_{\text{изм}}$ . Максимальный доплеровский сдвиг частоты, обусловленный перемещением объекта, определяется как  $f_D = 2V_{\text{макс}}/\lambda$ . При  $V_{\text{макс}} = 3 \text{ мм/с}$   $f_D \approx 10 \text{ кГц}$  и, согласно формуле (3),  $f_{\text{оп}} > 20 \text{ кГц}$ .

Конструктивно измеритель сверхмалых линейных перемещений выполнен в виде отдельного моноблока с закреплёнными на нем элементами и оптически связанной с исполнительным механизмом системой прецизионного позиционирования, соединённой электрическими кабелями с электронной фазометрической системой, сопряжённой, в свою очередь, с персональным компьютером. Отличительной особенностью измерителя сверхмалых линейных перемещений является простота оптической схемы, легкость ее юстировки, малые габариты, высокие быстродействие, помехозащищенность и надежность, обусловленные фазовыми методами обработки информационного сигнала.

При этом лазер ЛГН-304 обеспечивает стабилизированное по частоте и мощности оптическое излучение с длиной волны 0.6329909 мкм и выходной мощностью  $\sim 0.4 \text{ мВт}$ . Акустооптические модуляторы, входящие в состав интерференционного оптического преобразователя, предназначены для однополосного сдвига частоты лазерного излучения и выделения первых порядков дифракции при их работе в режиме Брэгга, а также управления оптической мощностью в каналах интерферометра. Фотоприемное устройство предназначено для выделения, усиления, преобразования информационного сигнала и его передачи в ЭФС. Электронная фазометрическая система предназначена для:

- 1) высокоточного измерения линейных перемещений объекта путем счета фазовых циклов и дополнительного угла фазового сдвига на радиочастоте ( $\Omega_{\text{изм}} \pm f_{\text{д}}$ ) в пределах  $0-360^\circ \times N$  ( $N$  — число циклов);
- 2) калибровки УФС с погрешностью  $\leq 0.3^\circ$ ;
- 3) передачи измерительной информации при помощи интерфейса связи в компьютер.

Действие электронной фазометрической системы заключается в измерении и обработке значений УФС в цифровом виде. Для этой цели проводится масштабно-временное преобразование оптического сигнала непрерывного лазерного излучения с последующим выделением в радиодиапазоне информативного параметра — значения угла фазового сдвига, измеряемого электронной фазометрической системой. Сигналы разностной и опорной частот подаются на дискриминатор фазы, умножитель дискретности, цифровой фазометр, а на второй измерительный вход подается сигнал с компаратора фотоприёмного устройства.

В дискриминаторе фазы и умножителе дискретности формируется временной интервал, пропорциональный фазовому сдвигу УФС. Полученный сигнал поступает на цифровой фазометр, где осуществляется функциональное преобразование: интервал времени  $\rightarrow$  цифровой код. Такое измерение проводится для каждого периода разностной частоты, и в случае работы в буферизированном режиме информация записывается в буфер обмена, где данные хранятся до пересылки в компьютер, обеспечивающий управление процессом измерений с помощью программы и устройства управления с интерфейсом.

Блок высокочастотных генераторов обеспечивает управление параметрами акустооптических модуляторов и выдачу со смесителя опорного сигнала промежуточной радиочастоты  $\Delta f_0$ . Высокостабильное значение разностной частоты между сформированными генераторами колебаниями поддерживается с помощью системы фазовой автоподстройки частоты (ФАПЧ). В состав ВЧ-генераторов входят два усилителя мощности ( $P \leq 1$  Вт), согласованные с АОМ, а также смеситель частот.

Важнейшей задачей метрологического обеспечения фазовых измерений в оптическом диапазоне является создание и калибровка эталонных фазовращателей (ЭФ), обеспечивающих аттестацию лазерных интерферометров-фазометров в полосе частот 30–100 МГц с погрешностью  $0.01-0.1^\circ$  при разрешающей способности  $0.005^\circ$ .

Наиболее перспективным является метод задания, регулирования и измерения УФС в радио- и оптическом диапазонах, положенный в основу создания радиооптического фазового компаратора, заключающийся в модуляции высокочастотным сигналом проходящего через акустооптический модулятор непрерывного лазерного излучения при его линейном перемещении вдоль распространения акустической волны.

Применение в составе фазового компаратора следящего высокоточного радиочастотного фазометра позволяет создать замкнутое «фазовое кольцо» по электрическому сигналу радиочастоты и обеспечивает прецизионное измерение, задание и регулирование УФС как в радио- (с использованием управля-

мого калибратора фазы), так и в оптическом диапазоне путём модуляции радиочастотным сигналом проходящего через акустооптический модулятор непрерывного лазерного излучения He–Ne-лазера.

### 6.3. Аттестация измерителя сверхмалых линейных перемещений

В основу метрологической аттестации измерителя положен метод, включающий в себя сравнение измеряемой величины линейных наноперемещений с длиной волны излучения He–Ne-лазера и использование эталонных средств измерений угла фазового сдвига как в радио-, так и в оптическом диапазонах.

В измерителе реализован новый способ калибровки лазерных интерферометров. Здесь используется сравнение измеряемого УФС непрерывного лазерного излучения в диапазоне  $0-360^\circ \times N$  ( $N=10^5$ ) с его калиброванным значением, задаваемым эталонным фазовращателем как в радио-, так и в оптическом диапазоне с использованием аттестованного следящего цифрового фазометра. При этом обеспечивается передача размера единицы УФС из радиодиапазона в оптический и обратно на разностной радиочастоте с погрешностью не более 0.1 градуса фазы, что соответствует дискретности отсчёта линейного перемещения менее  $10^{-10}$  м.

Такой способ измерений угла фазового сдвига непрерывного лазерного излучения и, как следствие, линейного перемещения (смещения) поверхности объекта позволил перейти от измерений разности фаз в оптическом диапазоне частот к измерениям УФС методами и средствами фазометрии радиодиапазона.

Применение высокоточного следящего цифрового фазометра позволяет создать замкнутое «фазовое кольцо» по электрическому сигналу радиочастоты и обеспечивает прецизионное измерение, задание и регулирование УФС как в радио-, так и в оптическом диапазоне по следующему алгоритму [20]:

$$\Delta\varphi_\Omega \leftrightarrow \Delta\varphi_L \leftrightarrow \Delta\varphi_\omega.$$

При этом материализованной мерой УФС в оптическом диапазоне служит акустооптический модулятор. Исследование метрологических характеристик электронного цифрового фазометра (ЭФС) показали, что погрешность измерения и регулирования УФС на разностной радиочастоте составляет 0.1 градуса фазы, что соответствует линейному перемещению менее 0.1 нм.

Исследования метрологических характеристик измерителя проводились в соответствии с разработанной методикой его аттестации как поэлементно, так и путем сличения результатов измерений линейных наноперемещений с использованием аттестованного в индивидуальном порядке эталонного задатчика наноперемещений (ЗНП-Э), обеспечивающего задание наноперемещений в диапазоне 1–1100 нм с погрешностью не более 0.3 нм.

Аттестация эталонного задатчика наноперемещений проводилась на установке высшей точности (УВТ 100-А-2000) для воспроизведения и передачи размера единицы длины, скорости и ускорения при колебательном движении твердого тела в диапазоне частот  $0.5-10^6$  Гц на основе лазерной интерферометрии и фазометрии. Исследования стабильности ИС показали, что скорость

дрейфа разности фаз лазерного гетеродинного интерферометра-фазометра не превышает  $10^{-2}$  градуса фазы за 1 мин, что определяет его чувствительность к линейным смещениям на уровне  $\sim 10^{-10}$ – $10^{-11}$  м.

Результаты сличений, проведенные с помощью эталонного задатчика наноперемещений на УВТ 100-А-2000 [21, 22] и измерителя, показали, что расхождение результатов измерений линейных перемещений не превышает 0.5 нм.

Для подтверждения достоверности результатов измерений сверхмалых перемещений были проведены совместные измерения линейных перемещений стандартного образца — атомарно-чистой поверхности высокоориентированного пиролитического графита методами лазерной интерферометрии-фазометрии и сканирующей туннельной микроскопии. Получено пространственное разрешение 0.24 нм, что соответствует постоянной решетки пирографита. Тем самым, впервые была осуществлена привязка параметра кристаллической решетки к длине волны стабилизированного He-Ne-лазера.

## 7. Выводы

1. Разработана концепция лазерной интерферометрии-фазометрии нано-, микро- и миллиметрового диапазона перемещений. Показано, что наиболее эффективными с точки зрения стабильности, точности, разрешающей способности и технической реализации являются модуляционно-компенсационный и гетеродинный способы преобразования лазерного излучения.

2. Анализ технических возможностей создания лазерных фазометров с учетом современного уровня метрологии и развития техники измерений длины, времени и параметров гармонических сигналов указывает на возможность измерения фазовых сдвигов в диапазоне  $0-2\pi$  с погрешностью  $\sim 10^{-4}$ – $10^{-5}$  рад.

3. Обоснованы физические принципы построения и калибровки прецизионных средств измерений угла фазового сдвига в радио- и оптическом диапазонах, позволяющие на два-три порядка повысить точность интерференционных методов измерений наносмещений.

4. Разработан измеритель сверхмалых линейных перемещений со следующими метрологическими характеристиками: диапазон измерений линейных перемещений составляет 1 нм–10 мм, дискретность отсчета 0.1 нм, абсолютная погрешность измерений 0.5 нм, максимальное значение измеряемой скорости перемещения объекта 3 мм/с.

5. Измеритель сверхмалых линейных перемещений предназначен для аттестации и калибровки систем сканирования и позиционирования, используемых в микро- и нанотехнологии, растровой электронной и сканирующей зондовой микроскопии, обеспечивая абсолютную привязку значений измеряемых перемещений к первичному эталону метра.

## ABSTRACT

Present-day methods of linear displacement measurements use laser interferometry. The measurements of very small linear displacements (less than 100 nm) are possible only with the help of performing additional measurement of the phase of

the laser radiation. We present a general scheme for such measurements, and describe the design of a laser interferometer–phasemeter based on this scheme. The measurement range for such interferometer-phasemeter is 1 nm–10 mm, the uncertainty being in the range of 0.5–3 nm.

## ЛИТЕРАТУРА

1. *Тодуа П.А., Календин В.В., Новиков Ю.А.* Российские достижения в нанометрологии // Вестник технического регулирования. 2004. № 6(7). С. 40–43.
2. *Тодуа П.А.* Фронт нанотехнологических исследований и нанометрология // Научно-практический семинар «Проблемы практического внедрения нанотехнологий и диагностика наносостояний». 6-я Специализированная выставка «Изделия и технологии двойного назначения. Конверсия ОПК». Сборник научных трудов и инженерных разработок. Результаты фундаментальных исследований и их использование в инженерных разработках. М., 2005. С. 76–78.
3. *Todua P.A., Zhelkobaev Zh.E., Kalendin V.V.* Fast laser two frequency interferometer-phasometer // Proc. V IMEKO-TC-74 Symposium on Dimensional Metrology in Production and Quality Control ISMOS-95. Spain, 1995. С. 111–113.
4. *Борн М., Вольф Э.* Основы оптики. М.: Наука, 1970. 856 с.
5. *Валитов Р.А., Сretenский С.Н.* Радиотехнические измерения. М.: Радио, 1970. 712 с.
6. *Мироненко А.В.* Фотоэлектрические измерительные системы. М.: Связь, 1967. 300 с.
7. *Мустель Е.Р., Парыгин В.Н.* Методы модуляции и сканирования света. М.: Наука, 1970. 295 с.
8. *Мезон У.* Физическая акустика. Том II. М.: Мир, 1974. 432 с.
9. *Корпел А.* Акустооптика. М.: Мир, 1988. 240 с.
10. *Магдич Л.Н., Молчанов В.Я.* Акустооптические явления и их применение. М.: Сов. Радио, 1978. 112 с.
11. *Галахова О.П., Колтик Е.Д., Кравченко С.А.* Основы фазометрии. М.: Энергия, 1976. 250 с.
12. *Пратт В.* Лазерные системы связи. М.: Связь, 1972. 240 с.
13. *Фотоприемники видимого и инфракрасного диапазона.* М.: Наука, 1985. 328 с.
14. *Глаубер Р.* Квантовая оптика и квантовая радиофизика. М.: Мир, 1966. 452 с.
15. *Рыкунов Л.Н.* Микросейсмь. М.: Наука, 1967. 65 с.
16. *Савельев И.В.* Курс общей физики. Книга 4. Волны. Оптика. М.: Астрель•АСТ, 2004. 256 с.
17. *Глозман И.А.* Пьезокерамика. М.: Радио, 1972. 200 с.
18. *Kalendin V.V., Barash V.Ia., Zhelkobaev Zh.* Radiooptical phase comparator of nanometric band // Proc. VIII Intl. Precision Engineering Seminar. France, 1995. P. 77.
19. *Ландсберг Г.С.* Оптика. М.: Физматлит, 2003. 848 с.
20. *Власов И.Э., Желкобаев Ж.Е., Иванов В.И., Календин В.В., Тодуа П.А., Черняков В.Н.* Лазерная интерференционная измерительная установка для калибровки первичных преобразователей систем неразрушающего контроля особо опасных промышленных объектов // Законодательная и прикладная метрология. 1999. № 3. С. 17–18.
21. *Ляпунов А.М., Новиков Ю.А., Раков А.В., Тодуа П.А.* Метрология линейных измерений наноматериалов, нанообъектов и наносистем // Интеграл. 2005. № 1(21). С. 14–16.

22. *Новиков Ю.А., Тодуа П.А.* Метрология линейных измерений нанометрового диапазона — основа микроэлектроники и нанотехнологии // Мир измерений. 2005. № 8. С. 4–9.