

К. А. Лукин¹, Ю. П. Мачехин², М. Б. Данаилов³, Д. Н. Татъянко¹

ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДА СПЕКТРАЛЬНОЙ ИНТЕРФЕРОМЕТРИИ ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ МИКРО- И НАНОРАССТОЯНИЙ

¹Институт радиофизики и электроники им. А. Я. Усикова НАН Украины
12, ул. Ак. Проскуры, г. Харьков, 61085, Украина
E-mail: lukin.konstantin@gmail.com, lukin@ire.kharkov.ua

²Харьковский национальный университет радиоэлектроники
14, пр. Ленина, г. Харьков, 61166, Украина

³Laser Laboratory, Synchrotron, SS14, km.163.5, 34012, Trieste, Italy

Представлены результаты исследований оптической интерферометрии на основе низкокогерентных источников излучения вне зоны когерентности. Показано, что когда разность плеч интерферометра Майкельсона превышает длину когерентности излучения светодиода, явление спектральной интерференции обеспечивает абсолютные измерения микро- и нанорасстояний в соответствии со временем задержки и относительной фазой между опорным и зондирующим сигналами.

Ключевые слова: спектральная интерферометрия, светодиод, шумовой оптический сигнал, интерферометр Майкельсона. Ил. 8. Библиогр.: 18 назв.

Интерферометрия, основанная на высокостабильных источниках лазерного излучения, обеспечивает прецизионные линейные измерения в пределах от единиц миллиметров до десятков метров. Недостатком существующих лазерных интерферометров для измерения наноразмеров, т. е. для размеров, много меньших длины волны излучения стабилизированного по частоте лазера, является недостаточная кратковременная стабильность частоты лазера [1]. Это не позволяет выполнять интерферометрические измерения микро- и нанорасстояний, что существенно ограничивает применение лазерных интерферометров для измерения наноразмеров и нанорасстояний. Поэтому поиск альтернативных оптических интерферометрических методов привел в конце XX века к развитию оптической когерентной томографии (ОКТ) [2–5], которая заключается в получении изображения различных поверхностей путем измерения величины и времени задержки широкополосного низкокогерентного оптического сигнала, отраженного от изучаемых объектов [2, 5]. Существует две основные разновидности ОКТ: временная ОКТ (*time-domain optical coherence tomography (OCT)*) и частотная ОКТ (*frequency-domain OCT*). В основе временной ОКТ лежит сканирующая интерферометрия, а частотная ОКТ основана на методе спектральной интерферометрии [2, 5].

ОКТ нашла применение в таких областях медицины, как офтальмология, стоматология, дерматология, кардиология и других биомедицинских задачах. В промышленности ОКТ используется для исследования характеристик поверхности материалов, например измерения параметров шероховатости поверхности, в частнос-

ти в бумажной промышленности для контроля качества бумаги, а также других приложениях. Однако развитие спектральной интерферометрии с использованием шумовых сигналов миллиметрового [6–12] и оптического [13] диапазонов позволило реализовать методы спектральной интерферометрии в указанных диапазонах.

На первом этапе спектральную интерферометрию (или оптическую шумовую локацию) планировалось развивать для решения задач прецизионного измерения расстояний от сотых долей до 100 м [13]. В дальнейшем, основываясь на универсальности метода оптической спектральной интерферометрии, исследования были направлены на развитие метода измерений абсолютных расстояний в области микро- и нанометрии.

В настоящей работе проведены теоретические и экспериментальные исследования метода спектральной интерферометрии при измерении микро- и нанорасстояний. Показано, какие источники оптического излучения можно использовать для измерения малых расстояний и какие ограничения накладываются на точность измерений.

1. Теоретическое обоснование применения метода для наноизмерений. Метод спектральной интерферометрии (или метод двойной спектральной обработки) основан на линейной интерференции гармонических составляющих спектра зондирующего и отраженного сигналов [6–13] при условии, что дальность до зондируемого объекта превышает длину когерентности источника излучения:

$$l_c = \frac{c}{\Delta f}, \quad (1)$$

где Δf – ширина частотного спектра зондирующего сигнала; c – скорость света в вакууме.

Представление длины когерентности через длину волны излучения имеет вид [14]

$$l_c = \frac{\lambda^2 - (\Delta\lambda/2)^2}{\Delta\lambda} \approx \frac{\lambda^2}{\Delta\lambda}, \text{ для } |\Delta\lambda/\lambda| \ll 1, \quad (2)$$

где λ и $\Delta\lambda$ – центральная длина волны и ширина спектра зондирующего шумового сигнала соответственно.

Метод может быть реализован с помощью классического интерферометра Майкельсона.

В случае одиночного отражателя спектральная мощность $F_\Sigma(f)$ сигнала на выходе интерферометра (выходе фотодетектора) может быть представлена в следующем виде [7]:

$$F_\Sigma(f, \tau_0) = 2F(f)\{1 + \cos(2\pi f\tau_0 + \theta)\}, \quad (3)$$

где θ – разность фаз между опорным и отраженным сигналами; f – частота сигнала; τ_0 – время распространения сигнала до отражателя и обратно.

Анализ спектра мощности $F_\Sigma(f)$ суммарного (зондирующего и отраженного) сигнала [7] позволяет получить информацию о дальности L_0 до зондируемого отражателя.

Спектральная мощность (3) действительна для бесконечного числа усреднений, что недоступно на практике. Предположим, что в измерениях мы имеем дело с эргодическими случайными сигналами и усреднение по множеству реализаций может быть заменено усреднением по времени. Средний интервал должен быть достаточно длительным, чтобы минимизировать разброс в оценке спектральной мощности из-за случайного характера исследуемого сигнала. Достаточно большая база сигнала (произведение ширины полосы пропускания на длительность сигнала) $\Delta f T_{mes} \gg 1$ обычно используется в качестве критерия для выбора соответствующего времени T_{mes} измерения/интегрирования.

Особенность спектра (3) этого сигнала состоит в периодическом чередовании максимумов и минимумов на оси частот (длин волн), которые являются следствием конструктивных, деструктивных и промежуточных интерференций гармонических спектральных компонент стационарных сигналов, суммируемых на выходе интерферометра [7]. Период этого чередования обратно пропорционален времени запаздывания τ_0 отраженного сигнала относительно зондирующего, что позволяет однозначно оценивать расстояние до отражателя. Для этого измеряется разность Δf_m частот f_1 и f_2 , соответствующая положению двух соседних экстремумов (максимумов либо минимумов) спектральной мощности (3), и

далее находится расстояние из следующего соотношения [6–13]:

$$L_0 = \frac{c}{2\Delta f_m} = \frac{c}{2(f_1 - f_2)}. \quad (4)$$

2. Источник излучения. Существует несколько методов получения спектрально ограниченных шумовых оптических сигналов с различной величиной ширины спектра [13]. Один из них – шумовая модуляция излучения одночастотного и одномодового He–Ne-лазера с помощью акустооптического модулятора. При всех преимуществах этого метода он очень дорогостоящий. Другой метод заключается в использовании одномодового излучения инжекционных полупроводниковых лазеров. Изготовленные по обычной технологии полупроводниковые лазеры работают с лоренцевской шириной линии излучения в пределах до 200 МГц. Эта величина зависит от рабочего тока полупроводникового лазера, поэтому путем подбора режима работы полупроводникового лазера можно обеспечить ее увеличение либо небольшое уменьшение. Третьим перспективным источником оптического излучения, который можно использовать в оптическом шумовом радаре, является фемтосекундный лазер, работающий в режиме генерации белого света (суперконтинуума) [2, 3].

Экономически наиболее перспективным источником излучения, который будет обеспечивать измерения расстояний от одного микрометра и меньше, является обычный светодиод, ширина спектра которого больше ширины спектра полупроводникового лазера, что позволяет расширить диапазон измеряемых расстояний в сторону уменьшения.

К источникам оптического излучения, используемым в оптической когерентной томографии, предъявляются определенные требования по рабочей длине волны излучения, ширине спектра, мощности и стабильности излучения [4].

В литературе по измерениям нанорасстояний представлялись исследования, в которых использовались низкокогерентные источники излучения с широкой спектральной полосой [15, 16]. Благодаря этой особенности используемых источников излучения данная область измерений называется низкокогерентная интерферометрия (*low-coherence interferometry*) или спектральная интерферометрия белого света (*white-light spectral interferometry*).

В выпускаемых промышленностью измерительных приборах (оптических когерентных томографах, микроскопах, профилометрах и т. д.) и в исследованиях, описанных в научной литературе, в качестве источников оптического излучения обычно используются так называемые суперлюминесцентные диоды (*superluminescent diodes*),

различные виды ламп (вольфрам-галогеновые и кварцевые лампы) [17, 18]. Они имеют большую стоимость либо малую спектральную плотность мощности.

В настоящей работе использованы светодиоды, выпускаемые серийно для решения задач индикации и освещения. Был выбран InGaAlP-светодиод *Toshiba TLRH190P*. Исследуемый светодиод обладает следующими характеристиками: центральная длина волны излучения светодиода 645 нм, ширина спектра излучения на полувысоте около 15 нм. Излучение на выходе светодиода расходится под углом 4°. Благодаря этому излучение светодиода использовано в интерферометре без дополнительной коллимации и фокусировки луча.

Производитель позиционирует данный тип светодиодов как «LED Lamp» в силу высокой яркости излучения 19 000 мккд. Спектральная характеристика излучения светодиода *TLRH190P* представлена на рис. 1. Электропитание светодиода осуществлялось от источника питания 9 В – 1,1 А.

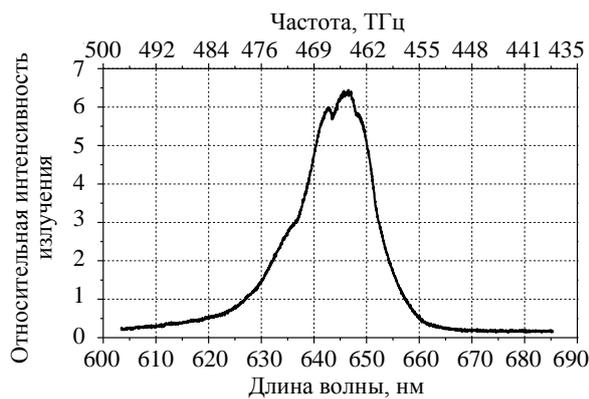


Рис. 1. Спектр излучения светодиода *Toshiba TLRH190P*

3. Экспериментальная установка. Для реализации метода спектральной интерферометрии при измерении нанорасстояний собрана экспериментальная установка по схеме оптического интерферометра Майкельсона (далее – интерферометра). Блок-схема установки (рис. 2) включает: 1 – источник излучения (светодиод *Toshiba TLRH190P*); 2 – зеркало; 4, 7 – Ag-зеркала (*Metal Mirror Ag: Er2, Newport*); 3 – светоделительная пластина 50/50 (*10RQ00UB.2, Newport*); 5 – стол поступательного перемещения (*F1-055/721299* фирмы *Magini & C* с микрометрическим винтом *TESA* с ценой деления 2 мкм); 6 – спектроанализатор (на базе монохроматора/спектрографа *M266 Solar Laser Systems, Беларусь*).

При проведении экспериментов реализованы две схемы измерений, отличающиеся способом ввода излучения в спектроанализатор. Первый показан на рис. 2: излучение распространялось в открытом пространстве и направлялось

на вход спектроанализатора посредством зеркала. Второй способ обеспечивал ввод излучения с выхода интерферометра в оптический спектроанализатор через оптическое волокно. Чтобы избежать нежелательных эффектов в волокне, решено отказаться от такого варианта экспериментальной установки. При использовании оптического волокна результат измерений качественно не менялся, но его влияние приводило к нестабильности мощности излучения, регистрируемой спектроанализатором.

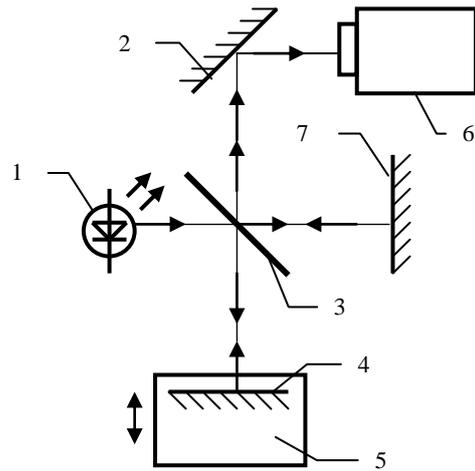


Рис. 2. Блок-схема экспериментальной установки. Интерферометр Майкельсона

Светоделительная пластина 3 делит поток излучения светодиода 1 на два луча в соотношении 50/50, направляя разделенные лучи на зеркала 4 и 7, которые образуют с пластиной 3 измерительное и опорное плечи интерферометра соответственно. Затем лучи, отраженные от зеркал 4 и 7, суммируются на пластине 3 и результирующий луч направляется на зеркало 2. Зеркало 2 направляет выходное излучение интерферометра на вход спектроанализатора 6. Зеркало 7 установлено неподвижно и образует опорное плечо, а зеркало 4 образует измерительное плечо и может перемещаться благодаря тому, что оно установлено на столе поступательного перемещения 5. При изменении разности плеч интерферометра путем перемещения измерительного зеркала 4 вдоль оптической оси плеча интерферометра наблюдалось возникновение периодической структуры спектра излучения светодиода на выходе интерферометра вне зоны когерентности светодиода и изменение ее периода.

При уменьшении измеряемого расстояния период чередования экстремумов спектра увеличивается, поэтому требуется использовать не только широкополосные источники излучения, но и широкополосные оптические спектроанализаторы.

В качестве спектроанализатора использовался монохроматор/спектрограф *M266 Solar Laser Systems* (Беларусь) с дифракционной решеткой 1 200 штрихов/мм и фотодиодной линейкой на 2 048 каналов. Среднее значение спектрального разрешения монохроматора/спектрографа *M266* менее 0,22 нм.

Экспериментальная установка представлена на рис. 3. На переднем плане – интерферометр Майкельсона, на заднем плане – поворотное зеркало на подставке и входной объектив монохроматора/спектрографа *M266*.

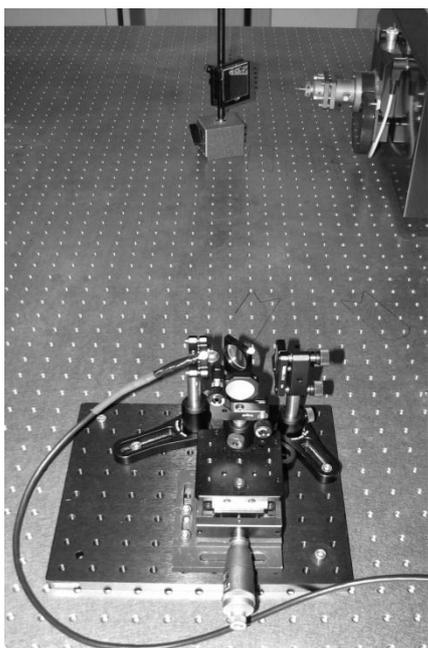


Рис. 3. Экспериментальная установка для исследования периодической структуры спектра излучения светодиода в зависимости от разности плеч интерферометра Майкельсона

Качество сборки и юстировки интерферометра определялось по картине пространственной интерференции в зоне когерентности источника излучения (рис. 4). Наблюдаемая квадратная форма центральной части луча обусловлена строением излучающей поверхности светодиода и для проводимых частотных измерений принципиального значения не имела, так как исследовался спектр излучения светодиода.

Проведено исследование пространственной интерференции для определения длины когерентности. Интерференционные кольца в поперечном сечении луча видны в пределах длины когерентности излучения источника. Следовательно, определив степень видности интерференционных колец, мы можем найти длину когерентности источника.

С помощью цифровой фотокамеры экспериментально получены изображения интер-

ференционных колец в поперечном сечении луча при изменении разности плеч интерферометра от максимальной видности интерференционных колец до их исчезновения. Анализ полученных изображений показал, что длина когерентности составляет ~16...18 мкм. Расчетное значение длины когерентности излучения исследуемого светодиода *Toshiba TLRH190P*, найденное из выражения (2), равно 27,7 мкм. Расхождение в расчетном и экспериментальном значениях длины когерентности можно объяснить неидеальностью параметров исследуемого образца светодиода, а также конечным разрешением регистрирующего оборудования (цифровой фотокамеры).

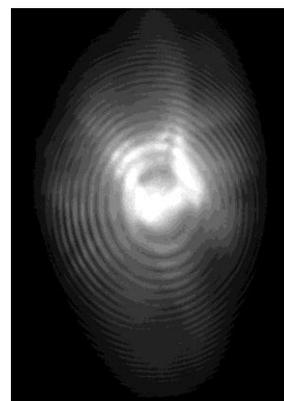


Рис. 4. Пространственная интерференция исследуемого излучения в интерферометре Майкельсона

4. Методика и результаты измерений.

После того как интерферометр проверили в условиях пространственной интерференции в зоне когерентности излучения, осуществили его перестройку. Разность плеч интерферометра была увеличена таким образом, что пропала пространственная интерференция и, следовательно, когерентность, а в спектральной области, т. е. в спектре шумового излучения, регистрируемого на выходе интерферометра, наблюдалась спектральная интерференция, которая хорошо описывается уравнением (3). Если установленная разность плеч интерферометра больше длины когерентности шумового излучения светодиода, то в регистрируемом спектре излучения наблюдается периодическая структура. Спектр излучения на выходе интерферометра, разность плеч которого превышает длину когерентности светодиода, представлен на рис. 5.

В ходе экспериментов исследовался спектр на выходе интерферометра в следующих диапазонах:

- на коротком участке вблизи зоны когерентности;
- в диапазоне расстояний: от зоны когерентности – до ~1 мм от зоны когерентности.

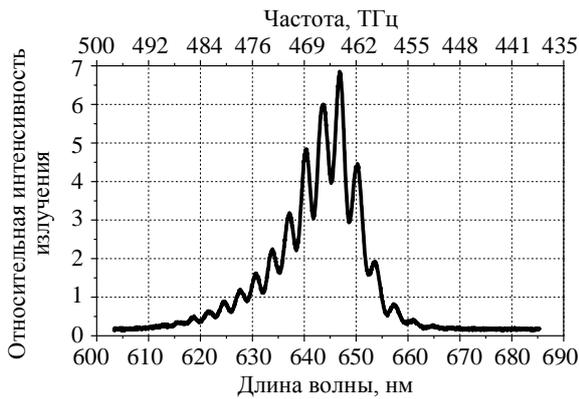


Рис. 5. Спектр излучения светодиода *Toshiba TLRH190P* на выходе интерферометра Майкельсона, разность плеч которого превышает длину когерентности излучения светодиода

В первом случае целью измерений было максимально точное определение нижней границы диапазона расстояний, при которой начинает проявляться эффект спектральной интерференции: структура спектра излучения становится периодической. Во втором случае цель исследований заключалась в изучении зависимости периода структуры спектра от разности плеч интерферометра, а также в определении чувствительности предлагаемого метода.

Измерения и обработка данных осуществлялись следующим образом. Экспериментальным путем были получены спектрограммы излучения на выходе исследуемого интерферометра при дискретном изменении разности плеч, т. е. для каждого значения разности плеч интерферометра получена отдельная спектрограмма. Так как экспериментальные данные были получены в виде спектра как функции длины волны, для обработки результатов измерений в соответствии с (3) полученные спектры были преобразованы в спектры как функции частоты. Далее проведена фурье-обработка каждого такого спектра, в результате чего для каждой спектрограммы получена спектральная линия периодической структуры, например как на рис. 6.

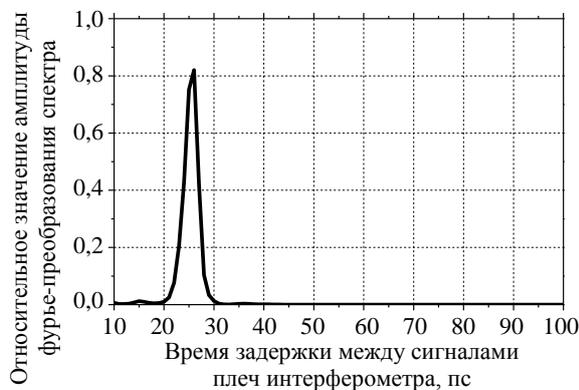


Рис. 6. Результат фурье-обработки спектрограммы представленной на рис. 5

Значение абсциссы данного максимума обратно пропорционально периоду чередования экстремумов на спектрограмме, пример которой показан на рис. 5, и отражает время задержки между сигналами в плечах интерферометра. Зная скорость распространения сигналов и используя найденное время задержки, находим разность длин плеч интерферометра, т. е. расстояние между опорной поверхностью и объектом. На рис. 6 показан результат фурье-обработки спектрограммы, представленной на рис. 5.

Определив значение абсциссы максимума фурье-обработки спектра для каждого значения разности плеч интерферометра, мы получили зависимость результата измерений от разности плеч. Полученные зависимости представлены на рис. 7 и 8 и соответствуют двум проводимым экспериментам.

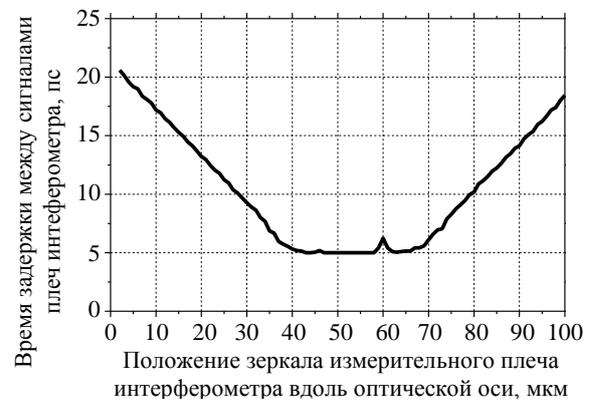


Рис. 7. Экспериментальная зависимость времени задержки между сигналами, распространяющимися в различных плечах интерферометра Майкельсона на базе светодиода *Toshiba TLRH190P*, от положения зеркала в измерительном плече вблизи зоны когерентности

На рис. 7 показана экспериментально полученная зависимость времени задержки между сигналами, которые распространяются в различных плечах интерферометра (сигналами плеч интерферометра) на базе светодиода *Toshiba TLRH190P* (что пропорционально измеряемому расстоянию), от положения зеркала измерительного плеча интерферометра вблизи зоны когерентности.

Сканирование проводилось таким образом: оно начиналось вне зоны когерентности, проходило через зону когерентности (плечи интерферометра равны) и заканчивалось за зоной когерентности. Разность плеч интерферометра изменялась с шагом 1 мкм. В результате можно наблюдать поведение спектра излучения на выходе интерферометра на границах зоны когерентности.

На графиках рис. 7 и 8, на оси абсцисс, для простоты восприятия положение зеркала из-

мерительного плеча интерферометра в начальной точке сканирования было принято как нулевое значение.

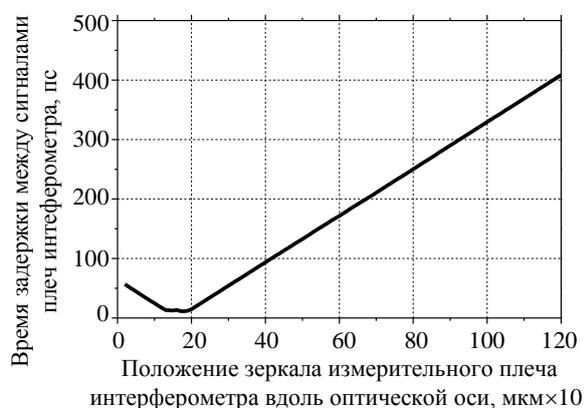


Рис. 8. Экспериментальная зависимость времени задержки между сигналами, распространяющимися в различных плечах интерферометра Майкельсона на базе светодиода *Toshiba TLRH190P*, от положения зеркала измерительного плеча

Результаты измерений, представленные на рис. 7 и 8, состоят из 11 сканирований зеркалом 4 (см. рис. 2) в одном направлении исследуемого диапазона расстояний и 11 сканирований в обратном направлении (для учета явления гистерезиса в используемой механике). Таким образом, одно измерение состоит из 22 сканирований.

При положении зеркала 4 (см. рис. 2) измерительного плеча интерферометра в диапазоне $\sim 36 \dots 70$ мкм (рис. 7) периодичность структуры спектра светодиода практически не наблюдается, следовательно спектральная интерференция в данной области отсутствует. Данный диапазон составляет ~ 34 мкм, т. е. около ± 17 мкм от точки равенства плеч интерферометра. В то же время, как было сказано ранее, экспериментальные исследования пространственной интерференции показали, что длина когерентности излучения на выходе интерферометра составляет $\sim 16 \dots 18$ мкм. Таким образом, можно сделать вывод, что эффект спектральной интерференции начинает проявляться за границей зоны когерентности – на расстоянии, превышающем длину когерентности.

На рис. 8 представлен результат измерений при изменении разности плеч интерферометра в диапазоне более 1 мм с шагом 10 мкм. Верхняя граница диапазона расстояний ограничивалась разрешающей способностью измерительной аппаратуры – монохроматора/спектрографа *Solar M266*.

График на рис. 8 представляет собой экспериментально полученную зависимость времени задержки между сигналами, распространяющимися в различных плечах интерферометра на базе светодиода *Toshiba TLRH190P* (что эквивалентно

измеряемому расстоянию), от положения зеркала измерительного плеча интерферометра в диапазоне расстояний около 1 мм от зоны когерентности. Демонстрирует линейную зависимость периода структуры спектра излучения от разности плеч интерферометра. Следовательно, зная период экстремумов в спектре излучения на выходе интерферометра, мы можем определить разность плеч, т. е. в случае использования данной схемы в измерителе расстояния мы можем узнать расстояние до объекта.

Была проведена оценка погрешности результатов измерений. Найдена максимальная абсолютная погрешность результатов измерений для измеряемых диапазонов расстояний при доверительной вероятности 0,95. Относительная погрешность результатов измерений, соответствующая найденной максимальной абсолютной погрешности, составила:

– 1,8–3 % – для измерения, результаты которого представлены на рис. 7;

– 3,3 % – для измерения, результаты которого представлены на рис. 8.

При изменении разности плеч интерферометра на 1 мкм (минимально возможный шаг для используемых механических элементов) период структуры спектра изменяется в среднем на 2,5 нм, что на порядок больше разрешающей способности по длине волны используемого спектроанализатора, равной 0,22 нм. Можно сделать вывод, что точность измерения расстояния на порядок меньше 1 мкм и составляет сотни нанометров.

Выводы. Описана теоретическая модель спектральной интерферометрии в оптическом диапазоне. В результате экспериментальной проверки метода спектральной интерферометрии в оптическом диапазоне показана возможность возникновения периодической структуры в спектре излучения светодиода *Toshiba TLRH190P* на выходе интерферометра в результате интерференции в некогерентном пределе, т. е. при расстояниях, превышающих длину когерентности излучения.

На примере светодиода *Toshiba TLRH190P* изучены возможности использования недорогих промышленно-выпускаемых низкокогерентных источников оптического излучения для измерения микро- и нанорасстояний с применением метода спектральной интерферометрии. Авторы предлагают и видят перспективы использования подобных светодиодов в приборах ОКТ, так как они значительно дешевле суперлюминесцентных диодов, обычно используемых в ОКТ, что позволит удешевить устройства на их основе.

Следует отметить, что в описанных экспериментах основное внимание уделялось исследованию самих физических эффектов и возможности использования для их получения недорогих источников излучения. При этом не ставилась

задача достижения максимальной точности измерения расстояния. Для достижения более высокой точности измерения длины в установке необходимо применять автоматизированное перемещение зеркал, используя механические узлы с пьезо-керамическими элементами.

Работа выполнена в отделе нелинейной динамики электронных систем (ИРЭ им. А. Я. Усикова НАНУ, г. Харьков, Украина) и лазерной лаборатории Синхротрона (*Elettra*, Триест, Италия) в рамках программы *STEP (Sandwich Training Educational Programme)*, проводимой Международным центром теоретической физики (*The Abdus Salam International Centre for Theoretical Physics (ICTP)*, Триест, Италия). Работа также поддерживалась УНТЦ проектом № 3377.

1. *Коронкевич В. П.* Современные лазерные интерферометры / В. П. Коронкевич, В. А. Ханов. – Новосибирск: Наука, 1985. – 181 с.
2. *Drexler W.* Optical Coherence Tomography: Technology and Applications / W. Drexler, J. Fujimoto. – Berlin: Berlin Springer-Verlag Heidelberg, 2008. – 1346 p.
3. *Dausinger F.* Femtosecond technology for technical and medical applications / F. Dausinger, F. Lichtner, H. Lubatschowski. – Berlin, Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2004. – 326 p.
4. *Bouta B. E.* Handbook of Optical Coherence Tomography / B. E. Bouma, G. J. Tearney. – New York: Marcel Dekker Inc, 2001. – 768 p.
5. *Гуров И. П.* Оптическая когерентная томография: принципы, проблемы и перспективы // Проблемы когерентной и нелинейной оптики / И. П. Гуров; под ред. И. П. Гурова, С. А. Козлова. – СПб: СПбГУ ИТМО, 2004. – С. 6–30.
6. *Ефимов Б. П.* О трансформации спектра стохастических колебаний автогенератора под действием отражений / Б. П. Ефимов, К. А. Лукин, В. А. Ракитянский // Журн. техн. физики. – 1988. – 58, № 12. – С. 2398–2400.
7. *Лукин К. А.* Шумовая радарная технология / К. А. Лукин // Радиофизика и электрон.: сб. науч. тр. / Ин-т радиофизики и электрон. НАН Украины. – Х., 1999. – 4, № 3. – С. 105–111.
8. *Кулик В. В.* Модификация метода двойной спектральной обработки шумовых сигналов / В. В. Кулик, К. А. Лукин, В. А. Ракитянский // Укр. метролог. журн. – 1997. – Вып. 4. – С. 28–32.
9. *Lukin K. A.* Millimeter Wave Noise Radar Applications, Theory and Experiment / K. A. Lukin // Proc. of the MSMW2001 Symposium. – Kharkiv, 2001. – V. 1. – P. 68–73.
10. *Lukin K. A.* Spectral Interferometry method and autodyne (self-mixing) effect for Noise Radar Application / K. A. Lukin, V. V. Kulyk, A. A. Mogylya // Proc. Int. Workshop on the Noise Radar Technology. – Yalta, 2002. – P. 179–186.
11. *Mogila A. A.* Statistical Errors of Ranging in the Spectral Interferometry Technique / A. A. Mogila, K. A. Lukin, V. V. Kulik // Telecommunications and Radio Engineering. – 2001. – 55, N 10–11. – P. 67–77.
12. *Могила А. А.* Статистическая погрешность измерения расстояния методом спектральной интерферометрии / А. А. Могила, К. А. Лукин, В. В. Кулик // Радиофизика и электрон.: сб. науч. тр. / Ин-т радиофизики и электрон. НАН Украины. – 2000. – 5, № 1. – С. 163–170.

13. *Лазерный измеритель расстояний на основе метода спектральной интерферометрии* / К. А. Лукин, Ю. П. Мачехин, А. А. Могила и др. // Прикладная радиоэлектрон. – 2010. – 9, № 2. – С. 240–245.
14. *Ghatak A.* Introduction to fiber optics / A. Ghatak, K. Thyagarajan. – Cambridge: Cambridge University Press, 1998. – 565 p.
15. *Schnell U.* Absolute distance measurement with synchronously sampled white-light channelled spectrum interferometry / U. Schnell, E. Zimmermann, R. Dändliker // Pure Appl. Opt. – 1995. – 4, N 5. – P. 643–651.
16. *Manojlović Lazo M.* A simple white-light fiber-optic interferometric sensing system for absolute position measurement / Lazo M. Manojlović // Optics and Lasers in Engineering. – 2010. – 48, N 4. – P. 486–490.
17. *Brundavanam Maruthi M.* Nanodisplacement measurement using spectral shifts in a white-light interferometer / M. M. Brundavanam, N. K. Viswanathan, D. Narayana Rao // Applied optics. – 2008. – 47, N 34. – P. 6334–6339.
18. *Hlubina P.* Dispersive white-light spectral interferometry to measure distances and displacements / P. Hlubina // Optics Communications. – 2002. – 212, N 1 – P. 65–70.

K. A. Lukin, Yu. P. Machekhin, M. B. Danailov,
D. N. Tatyanko

APPLICATION OF THE SPECTRAL INTERFEROMETRY METHOD FOR MICRO- AND NANODISTANCES MEASUREMENT

The paper presents some results of the optical interferometry investigations with use of low-coherent optical sources beyond their coherence zone. It is shown that when the path difference of arms in Michelson interferometer exceeds the coherence length of light-emitting diode radiation, the interference pattern in spectral domain enables to perform absolute measurements of micro and nano distances due to its dependence on both time delay and relative phase of the signals.

Key words: spectral interferometry, light emitting diode, noise optical signal, Michelson interferometer.

К. О. Лукін, Ю. П. Мачехін, М. Б. Данаїлов,
Д. М. Татянок

ЗАСТОСУВАННЯ МЕТОДУ СПЕКТРАЛЬНОЇ ІНТЕРФЕРОМЕТРІЇ ДЛЯ ВИМІРЮВАННЯ МІКРО- ТА НАНОВІДСТАНЕЙ

Наведено результати досліджень оптичної інтерферометрії на основі низькокогерентних джерел випромінювання поза зони когерентності. Показано, що коли різниця пліч інтерферометра Майкельсона перевищує довжину когерентності випромінювання світлодіода, явище спектральної інтерференції забезпечує абсолютні вимірювання мікро- та нановідстаней згідно з часом затримки та відносною фазою між опорним та зондуємим сигналами.

Ключові слова: спектральна інтерферометрія, світлодіод, шумовий оптичний сигнал, інтерферометр Майкельсона.

Рукопись поступила 14.12.10 г.