

## ЛАЗЕРНЫЙ ИНТЕРФЕРОМЕТР С ОСТРОСФОКУСИРОВАННЫМ ПУЧКОМ В СИСТЕМЕ ТРЕХ СВЯЗАННЫХ ИНТЕРФЕРОМЕТРОВ

*Д.В. Лякин, В.В. Лычагов, В.П. Рябухо, М.И. Лобачев*  
*Институт проблем точной механики и управления РАН*  
*Саратовский государственный университет*

### *Аннотация*

Рассматривается система связанных интерферометров – измерительного и двух вспомогательных, построенных по схеме Майкельсона, для контроля пространственного положения (формы) объекта или параметров слоистых структур. Измерительный интерферометр функционирует на эффекте согласования интерферирующих полей и формирует интерференционный импульс совпадения фокуса зондирующего лазерного пучка с контролируемой поверхностью. Вспомогательный низкокогерентный интерферометр формирует опорный интерференционный импульс, относительно которого определяется положение измерительного импульса в шкале разности хода. Для этого служит вспомогательный лазерный интерферометр. Рассматривается теория интерферометров, схемные решения и алгоритмы компьютерной обработки сигналов. Приводятся экспериментальные результаты, анализируется точность измерений.

### *Введение*

Лазерные системы широко используются для размерного контроля, пространственного положения поверхности объекта и границ раздела сред в слоистых структурах, макроформы и микроструктуры поверхности и т.п. [1-10]. Для решения этих измерительных задач используются различные методы и подходы, основанные, в основном, на высокой степени пространственной и временной когерентности лазерного излучения, и, как следствие, на возможности использования острой фокусировки лазерного пучка, эффектов интерференции и дифракции света.

Метод точной фокусировки лазерного пучка [6, 7, 10] нашел широкое практическое использование в силу относительной простоты реализации и достаточно высокой точности измерений. Этот метод относится к так называемым амплитудным методам оптических измерений и основан на регистрации сигнала совпадения отражающей поверхности с фокусом зондирующего лазерного пучка. Для этого используется точечная апертура фотоприемника, оптически сопряженная с фокусом зондирующего лазерного пучка. Поэтому данный метод чаще всего называют конфокальной микроскопией [11-14]. Точность метода определяется числовой апертурой используемой фокусирующей оптической системы и длиной волны излучения. Для увеличения точности измерений в конфокальной микроскопии используют когерентный опорный пучок и, соответственно, интерференционный эффект, что позволяет регистрировать положение отражающей поверхности с точностью до долей длины волны [11, 12, 15-17].

В конфокальной микроскопии использованием точечной апертуры фотоприемника исключается влияние фоновой засветки, что позволяет получать сигнал от объемной слоистой структуры рассеивающих объектов.

В определенном смысле альтернативным методом определения пространственного положения объекта и параметров слоистых структур является

метод оптической низкокогерентной интерферометрии [18-23]. В этом методе используется широкополосный источник света с малой длиной временной когерентности излучения, но с достаточно малой излучающей поверхностью и, как следствие, с высокой степенью пространственной когерентности излучения. Метод заключается в регистрации интерференционного сигнала совпадения длин оптических путей в опорном и объектном плечах интерферометра. Этот сигнал совпадения представляет собой интерференционный импульс временной когерентности в шкале разности хода с высокочастотной несущей, определяемой длиной волны, и огибающей, определяемой модулем функции временной когерентности излучения. Ширина огибающей этого импульса в шкале разности хода определяется длиной временной когерентности используемого излучения, а период осциллирующей несущей - средней длиной волны излучения.

В настоящей работе рассматривается новый интерференционный метод точной фокусировки лазерного пучка, который сочетает в себе принципы конфокальной микроскопии и низкокогерентной интерферометрии. Метод основан на эффектах согласования и интерференции предметного и опорного волновых полей и формировании интерференционного импульса совпадения фокуса зондирующего пучка с поверхностью контролируемого объекта. Рассматривается практическая реализация этого метода с использованием системы трех связанных интерферометров с лазерными и низкокогерентными источниками света для определения пространственного положения поверхности объекта и параметров слоистых структур.

### *1. Система трех связанных интерферометров*

Рассматриваемая в настоящей работе интерференционная система включает в себя три связанных интерферометра, построенных по схеме Майкельсона (рис.1).

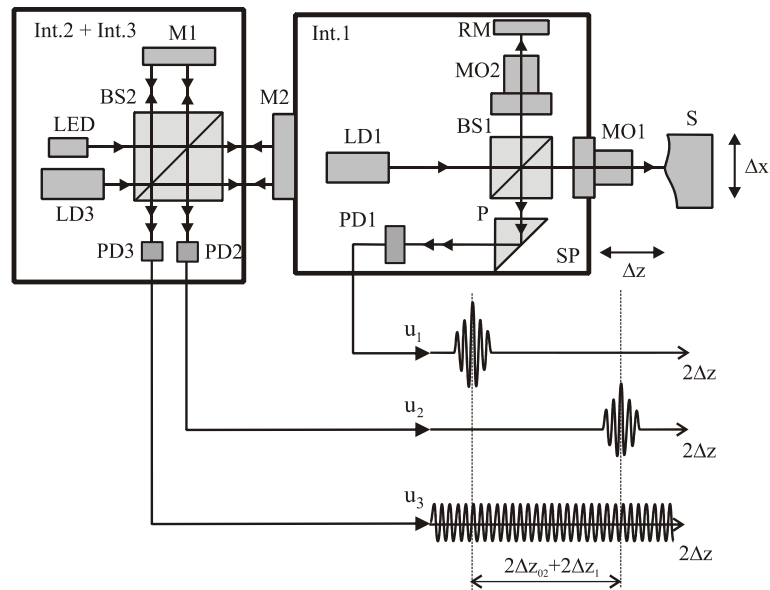


Рис. 1. Система трех связанных интерферометров: *Int.1* – основной сканирующий интерферометр с остросфокусированным лазерным пучком; *LD1* – лазерный диод; *BS1* – делитель пучка; *SP* – сканирующая платформа; *RM* – опорное зеркало; *S* – объект контроля; *MO1* и *MO2* – микрообъективы; *PD1* – фотодетектор;  $u_1$  – выходной сигнал интерферометра; *Int.2* – вспомогательный интерферометр с низкокогерентным источником света: *LED* – светодиод; *BS2* – делитель пучка; *M1* – опорное зеркало; *M2* – зеркало, жестко закрепленное на сканирующей платформе *SP* интерферометра *Int.1*; *PD2* – фотодетектор;  $u_2$  – выходной сигнал интерферометра; *Int.3* – вспомогательный интерферометр с параллельным лазерным пучком на базе оптических элементов низкокогерентного интерферометра *Int.2*; *PD3* – фотодетектор;  $u_3$  – выходной сигнал интерферометра

Первый, основной, сканирующий интерферометр *Int.1* с остросфокусированным лазерным пучком используется для зондирования контролируемого объекта и формирования интерференционного импульса  $u_1$  совпадения фокуса лазерного пучка с поверхностью объекта или отражающей границей слоистой структуры.

Второй, вспомогательный, интерферометр *Int.2* с низкокогерентным источником используется в качестве следящей системы для формирования интерференционного импульса  $u_2$  фиксации пространственного положения первого интерферометра. Интерференционные импульсы сканирующего ( $u_1$ ) и следящего ( $u_2$ ) интерферометров разнесены во времени и, соответственно, разнесены в шкале разности хода интерферирующих волн (рис. 1).

Третий, также вспомогательный, интерферометр *Int.3* с квазипараллельным лазерным пучком используется в качестве средства измерения смещения сканирующего интерферометра – фактически для измерения расстояния между импульсами сканирующего и следящего интерферометров в шкале разности хода.

На выходе этого интерферометра формируется практически амплитудно немодулированный сигнал  $u_3$ , интерференционные осцилляции которого используются в качестве шкалы отсчета.

Ниже рассмотрены принципы действия и функциональное назначение каждого интерферометра и всей системы в целом.

## 2. Интерферометр с остросфокусированным предметным пучком и интегрирующей апертурой фотоприемника

Для формирования импульса совпадения контроля поверхности и фокуса зондирующего лазерного пучка в рассматриваемой системе используется интерферометр, функционирующий на принципах согласования объектного и опорного волновых полей на протяженной апертуре фотоприемника. На выходе такого интерферометра формируется импульсный интерференционный сигнал с максимальным коэффициентом модуляции интерференционных осцилляций при максимальном согласовании интерферирующих полей [24]. Эффект рассогласования интерферирующих полей при продольном смещении контролируемой поверхности относительно фокуса зондирующего лазерного пучка зависит от числовой апертуры пучка  $NA$  и длины волны  $\lambda$ . Чем больше  $NA$ , тем более узкий интерференционный импульс в шкале разности хода формируется на выходе интерферометра.

На рис. 2 представлена оптическая схема сканирующего интерферометра с остросфокусированным предметным (зондирующим) лазерным пучком. Излучение лазерного диода *LD1* разделяется светоделителем на опорный и предметный пучки, которые фокусируются, соответственно, на опорное зеркало *RM* и на поверхность контролируемого объекта *S*. Отраженные опорный и предметный пучки света с использованием поворотной призмы *P* направляются на фотодетектор *PD1*. Весь интерферометр за ис-

ключением объекта S располагается на сканирующей платформе SP, совершающей колебания вдоль оси Z с достаточно большой амплитудой  $l_0 \approx 1$  мм и низкой частотой  $f_0 \approx 1$  Гц. Таким образом изменяется разность хода волн в интерферометре и происходит расфокусировка лазерного пучка на поверхности объекта.

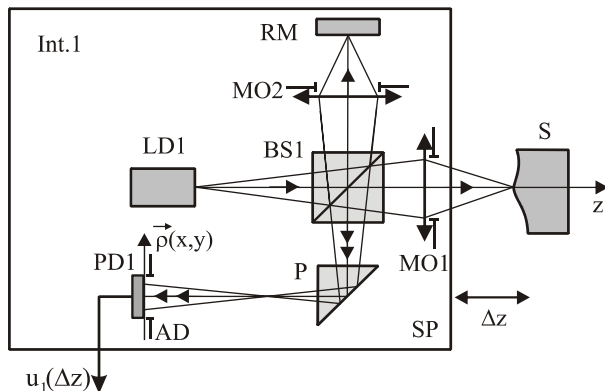


Рис. 2. Оптическая схема лазерного интерферометра с остросфокусированным предметным пучком и протяженной интегрирующей апертурой фотоприемника: LD1 – лазерный диод;

BS1 – делитель пучка; MO1, MO2 – фокусирующие линзы (микрообъективы); RM – опорное зеркало;

S – объект контроля; P – поворотная призма;

PD1 – фотодетектор; SP – сканирующая платформа, на которой расположен интерферометр;

$\Delta z$  – смещение сканирующей платформы;

AD – апертурная диафрагма фотодетектора PD1;

$u_1(\Delta z)$  – выходной сигнал интерферометра

При совпадении фокусов опорного и предметного пучков света, соответственно, с поверхностью опорного зеркала RM и поверхностью объекта S оптические поля оказываются максимально согласованными на достаточно протяженной апертуре AD фотоприемника PD1. Это означает, что разность фаз интерферирующих полей  $\Delta\varphi_{SR}(x, y)$  имеет минимальные изменения в плоскости XY апертуры фотоприемника, а амплитудные распределения этих полей  $A_R(x, y)$  и  $A_S(x, y)$  в максимальной степени совпадают,  $A_R(x, y)/A_S(x, y) \approx const$ .

Отметим, что полному согласованию полей могут помешать aberrации оптических элементов в плечах интерферометра, несоосность фокусирующих объективов, а также шероховатость поверхности объекта, в результате которой возникает спекл-модуляция предметного волнового поля и комплексная амплитуда этого поля  $U_S(x, y) = A_S(x, y)\exp(i\varphi_S(x, y))$  приобретает случайный пространственный характер.

Для выходного фотоэлектрического сигнала интерферометра  $u_1(\Delta z)$  в предположении полной взаимной когерентности интерферирующих полей можно записать следующее выражение:

$$u_1(\Delta z) \sim \left[ \iint_{S_p} I(\vec{\rho}) d^2\vec{\rho} = \iint_{S_p} [I_R(\vec{\rho}) + I_S(\vec{\rho}, \Delta z, \Delta z_1) + 2A_R(\vec{\rho})A_S(\vec{\rho}, \Delta z, \Delta z_1) + \cos\left(\frac{2\pi}{\lambda_1}[2\Delta z + 2\Delta z_1] + \frac{2\pi}{\lambda_1}2\Delta z_{01} + \Delta\varphi_{RS}(\vec{\rho}, \Delta z, \Delta z_1)\right)] d^2\vec{\rho} \right], \quad (1)$$

где  $\Delta z$  – смещение интерферометра относительно поверхности объекта,  $I(\vec{\rho})$  – распределение интенсивности света в интерференционной картине на апертуре  $S_p$  фотоприемника  $\vec{\rho}(x, y)$ ;  $I_R(\vec{\rho})$ ,  $I_S(\vec{\rho})$  – распределения интенсивности в опорном и предметном полях;  $\Delta z_1$  – начальное расстояние между фокусом предметного пучка и поверхностью объекта (начальная расфокусировка), в предположении, что опорный пучок точно сфокусирован на опорном зеркале;  $2\Delta z_{01}$  – оптическая разность хода волн в интерферометре при точной фокусировке пучков в предметном и опорном плечах интерферометра, возникающая, например, при неравенстве оптических путей в плечах интерферометра от светоделителя до фокусирующих свет объективов;  $\Delta\varphi_{RS}(\vec{\rho}, \Delta z, \Delta z_1)$  – разность фаз опорного и предметного полей на апертуре фотоприемника, возникающая при смещении  $\Delta z + \Delta z_1$  фокуса предметного лазерного пучка относительно поверхности объекта;  $\lambda_1$  – длина волны света лазерного диода LD1.

Первое слагаемое в (1)  $\iint_{S_p} I_R(\vec{\rho}) d^2\vec{\rho}$  определяет постоянную составляющую сигнала фотоприемника, второе слагаемое  $\iint_{S_p} I_S(\vec{\rho}, \Delta z, \Delta z_1) d^2\vec{\rho}$  – медленно меняющуюся с изменением  $\Delta z$  составляющую. Третье, быстро осциллирующее слагаемое, определяет переменную составляющую с интерференционными осцилляциями с периодом  $\lambda_1$  в шкале разности хода  $\Delta$  и огибающей, определяемой эффектом рассогласования интерферирующих полей по амплитудным,  $A_R(\vec{\rho})$  и  $A_S(\vec{\rho}, \Delta z, \Delta z_1)$ , и/или фазовым  $\Delta\varphi_{RS}(\vec{\rho}, \Delta z, \Delta z_1)$  распределениям на апертуре  $S_p$  фотоприемника.

Влияние эффектов амплитудного и/или фазового рассогласований на огибающую интерференционного слагаемого зависит от положения апертуры фотоприемника относительно плоскости  $S'_R$  (рис. 3), оптически сопряженной с поверхностью опорного зеркала RM. При совпадении апертуры фотодетектора  $S_p$  с плоскостью  $S'_R$  – фокусом опорного пучка света, определяющую роль играет эффект амплитудного рассогласования полей (см., например, [25]). При значительном удалении апертуры фотоприемника от плоскости  $S'_R$  определяющую роль играет фазовое рассогласование полей при практическом отсутствии амплитудного рассогласования.

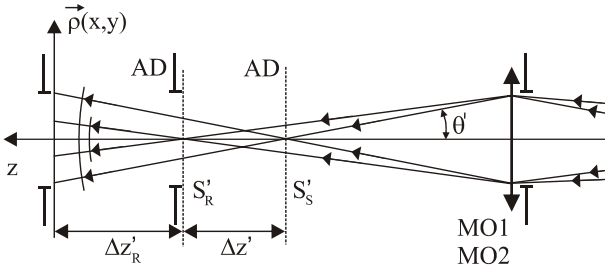


Рис. 3. К определению влияния фазового рассогласования опорного и предметного оптических полей

Однако оба этих эффекта рассогласования и их совместное действие приводят, что подтверждается теоретически и экспериментально, к одинаковым количественным результатам, определяющим огибающую интерференционного сигнала. Действительно, при амплитудном рассогласовании, когда апертура фотоприемника располагается в плоскости  $S'_R$  - в фокусе опорного пучка, который играет роль эффективной апертуры системы, подобно точечному отверстию в конфокальной микроскопии, смещение фокуса зондирующего лазерного пучка  $\Delta z + \Delta z_1$  относительно поверхности предмета приводит к расфокусировке предметного пучка, увеличению его поперечного сечения и соответствующему уменьшению интенсивности этого пучка в пределах фокуса опорного пучка.

Фазовое рассогласование  $\Delta\varphi_{RS}(\vec{\rho})$  доминирует при расположении апертуры фотоприемника вдали от плоскости фокусировки  $S'_R$  опорного пучка [24].

В предположении интерференции сферических опорной и предметной волн для разности фаз  $\Delta\varphi_{RS}(\vec{\rho})$  на апертуре фотоприемника (см. рис. 3) может быть получено выражение

$$\Delta\varphi_{RS}(\vec{\rho}) = \frac{\pi}{\lambda_1} \left( \frac{1}{z'_R} - \frac{1}{z'_S} \right) \rho^2 \approx -\frac{\pi}{\lambda_1} \frac{\Delta z'}{z'^2_R} \rho^2, \quad (2)$$

где  $z'_R$  и  $z'_S$  - расстояния от центров кривизны опорной и предметной волн до плоскости апертуры фотоприемника,  $\Delta z' = z'_R - z'_S$ .

Интегрирование по круглой апертуре фотоприемника с диаметром  $D_p$  в предположении постоянства амплитуд  $A_R$  и  $A_S$  опорного и предметного полей в пределах этой апертуры приводит к следующему выражению для третьего слагаемого в (1):

$$\begin{aligned} \tilde{u}_i(2\Delta z) \sim & \frac{\sin(\pi D_p^2 \Delta z' / 8\lambda_1 z'^2_R)}{(\pi D_p^2 \Delta z' / 8\lambda_1 z'^2_R)} \times \\ & \times \cos\left(\frac{2\pi}{\lambda_1} [2\Delta z + 2\Delta z_1 + 2\Delta z_{01}] - \frac{D_p}{8\lambda_1 z'^2_R} \Delta z'\right), \end{aligned} \quad (3)$$

Используя условие синусов Аббе [27] для хода лучей через фокусирующий микрообъектив в предметном плече интерферометра, можем записать

$$\sin(\theta') \approx \theta' = \frac{1}{M} \sin(\theta) = \frac{NA}{M}, \quad (4)$$

$$\Delta z' = (2\Delta z + 2\Delta z_1) M^2, \quad (5)$$

где  $M$  - поперечное увеличение объектива в предметном плече,  $\theta$  и  $\theta'$  - углы прохождения крайних лучей через апертуру объектива в пространстве предмета и его изображения,  $NA$  - числовая апертура фокусируемого на объект лазерного пучка,  $M^2$  - продольное увеличение.

Подставляя (4), (5) в (3) получаем выражение для переменной составляющей сигнала интерферометра с остросфокусированным зондирующим пучком в следующем виде:

$$\begin{aligned} \tilde{u}_i(2\Delta z) \sim & \frac{\sin\left(\frac{\pi}{2\lambda_1} NA^2 [2\Delta z + 2\Delta z_1]\right)}{\left(\frac{\pi}{2\lambda_1} NA^2 [2\Delta z + 2\Delta z_1]\right)} \times \\ & \times \cos\left(\frac{2\pi}{\lambda_1} [2\Delta z + 2\Delta z_1 + 2\Delta z_{01}] - \right. \\ & \left. - \frac{\pi}{2\lambda_1} NA^2 [2\Delta z + 2\Delta z_1]\right). \end{aligned} \quad (6)$$

Отметим, что согласно уравнению (6) начальная разность хода  $2\Delta z_{01}$  в данном интерферометре в отличие от низкокогерентного интерферометра не влияет на положение интерференционного импульса. Это определяет важное практическое значение рассматриваемого интерферометра по отношению к низкокогерентному интерферометру - не требуется точно выравнять оптические пути в плечах. Положение интерференционного импульса в шкале оптической разности хода (или шкале относительного смещения объект-интерферометр) будет определяться значением начальной расфокусировки  $\Delta z_1$ .

Из уравнения (6) легко сделать оценку полуширины  $L_c$  интерференционного импульса в шкале изменения разности хода  $2\Delta z$  по спадаанию амплитуды интерференционных осцилляций этого сигнала до половины максимальной амплитуды

$$L_c \approx \frac{1,2\lambda_1}{NA^2}. \quad (7)$$

Величина  $L_c$  определяет продольное разрешение рассматриваемого интерферометра по аналогии с длиной временной когерентности  $l_c$  в низкокогерентной интерферометрии.

При использовании высокоапертурных микрообъективов  $NA \approx 1$  в интерференционном импульсе будет проявляться всего несколько осцилляций. Таким образом, ширина импульса рассматриваемого интерферометра может составлять всего 1-3 мкм,

что предопределяет заметно более высокое пространственное разрешение по сравнению с низкокогерентной интерферометрией.

### 3. Вспомогательный низкокогерентный интерферометр

Для регистрации пространственного положения сканирующего лазерного интерферометра используется интерферометр Майкельсона с низкокогерентным (широкополосным) источником света (например, светодиодом). Одно зеркало этого интерферометра жестко закреплено на сканирующей платформе SP лазерного интерферометра с остророфокусированным зондирующим пучком (рис.1). На выходе низкокогерентного интерферометра формируется сигнал с переменной составляющей  $u_2(2\Delta z)$ , интерференционные осцилляции которого модулированы по амплитуде модулем функции временной когерентности излучения источника  $\Gamma(2\Delta z)$ :

$$\tilde{u}_2(2\Delta z) \sim |\Gamma(2\Delta z + 2\Delta z_{02})| \times \cos\left(\frac{2\pi}{\lambda_2} 2\Delta z + \frac{2\pi}{\lambda_2} 2\Delta z_{02}\right), \quad (8)$$

где  $\lambda_2$  - средняя длина волны низкокогерентного источника,  $2\Delta z_{02}$  - начальная разность хода волн в плечах интерферометра;  $2\Delta z + 2\Delta z_{02} = \Delta_2$  - полная разность хода волн в этом интерферометре.

Для модуля  $\Gamma(\Delta_2)$  можно использовать приближение в виде гауссовой функции

$$|\Gamma(\Delta_2)| \approx I_0 \exp\left\{-\left(\frac{\Delta_2}{l_c}\right)^2\right\}, \quad (9)$$

где  $l_c \approx \lambda_2^2/\Delta\lambda_2$  - длина временной когерентности,  $\Delta\lambda_2$  - ширина спектрального контура излучения. Таким образом, ширина интерференционного импульса низкокогерентного интерферометра определяется длиной когерентности  $l_c$ .

Из (8) следует, что при продольном смещении  $\Delta z$  сканирующего лазерного интерферометра на выходе низкокогерентного интерферометра формируется импульс временной когерентности с максимальной амплитудой осцилляций при  $\Delta z = -\Delta z_{02}$ . Этот импульс в рассматриваемой интерференционной системе используется в качестве опорного импульса начала отсчета пространственного положения платформы лазерного сканирующего интерферометра. Таким образом, низкокогерентный интерферометр, вернее, пространственное положение его опорного зеркала М1, служит опорой в определении пространственного положения поверхности контролируемого объекта.

Отметим, поскольку в рассматриваемом низкокогерентном интерферометре используются плоские зеркала, то возможно использование протяженного

источника света, излучение которого пространственно частично когерентно. Влияние малого радиуса поперечной пространственной когерентности излучения  $\rho_c$  легко исключается соответствующим юстировочным наклоном неподвижного зеркала интерферометра.

В наших экспериментах в качестве низкокогерентных источников использовались красные ( $\lambda_2 \approx 0,64$  мкм) светодиоды с длиной временной когерентности  $l_c \approx 8$  мкм.

### 4. Вспомогательный лазерный интерферометр для определения величины смещения платформы сканирующего интерферометра

Оптические элементы низкокогерентного интерферометра Int-2 (рис.1) – делительная призма-куб и зеркала, использовались одновременно для вспомогательного лазерного интерферометра с параллельным пучком света. Иными словами, на входе одного интерферометра использовались сразу два источника – светодиод и лазерный диод, а на выходе – два фотоприемника, пространственное положение которых обеспечивало отдельную регистрацию сигналов этих интерферометров. Лазерный канал интерферометра использовался для получения практически немодулированного по амплитуде квазисинусоидального сигнала с известным периодом осцилляций, определяемым длиной волны лазера  $\lambda_3$ :

$$\tilde{u}_3(2\Delta z) \sim \cos\left(\frac{2\pi}{\lambda_3} 2\Delta z + \frac{2\pi}{\lambda_3} 2\Delta z_{03}\right), \quad (10)$$

где  $2\Delta z_{03}$  - как и в (8), начальная разность хода волн в интерферометре.

Поскольку в системе использовалось не равномерное, а колебательное движение платформы сканирующего интерферометра, то сигнал (10) имеет временную частотную модуляцию, поскольку уравнение смещения платформы можно записать в виде

$$\Delta z(t) = l_0 \sin(2\pi f_0 t + \varphi_0), \quad (11)$$

где  $l_0$  и  $f_0$ , соответственно, амплитуда и частота колебаний платформы. Однако изменение частоты осцилляций сигнала  $u_3$  не влияет на результат измерений, поскольку величина  $\Delta z$  определяется числом этих осцилляций, каждая из которых связана с изменением  $\Delta z$  на  $\lambda_3/2$ .

### 5. Алгоритм обработки сигналов интерферометров и экспериментальные результаты

Таким образом, на выходе рассматриваемой интерференционной системы формируются три интерференционных сигнала:

(1) – сигнал совпадения фокуса лазерного пучка с контролируемой поверхностью,  $\tilde{u}_1(\Delta z)$ ;

(2) – сигнал начала отсчета положения сканирующей платформы,  $\tilde{u}_2(\Delta z)$ ;

(3) – сигнал отсчета величины смещения платформы,  $\tilde{u}_3(\Delta z)$ .

При изменении положения поверхности объекта вдоль оптической оси объектива в предметном плече сканирующего интерферометра (изменении величины расфокусировки  $\Delta z_1$ ), изменяется положение измерительного импульсного сигнала  $\tilde{u}_1(\Delta z)$  сканирующего интерферометра относительно импульса  $\tilde{u}_2(\Delta z)$  низкокогерентного интерферометра, играющего роль опорного интерференционного импульса, в шкале смещения сканирующей платформы  $\Delta z$ . Величина смещения измерительного импульса относительно опорного импульса определяется с помощью так называемой «интерференционной линейки» - сигнала  $\tilde{u}_3(\Delta z)$  интерферометра с параллельным лазерным пучком. Цена деления этой линейки  $\Delta z_{\min}$ , как величина смещения платформы, при которой максимум интерференционной осцилляции заменяется минимумом, равна  $\Delta z_{\min} = \lambda_3/4$ .

Процедура определения величины смещения поверхности объекта измерительного импульса сканирующего интерферометра сводится к следующему алгоритму:

(1) определяется расстояние  $\Delta z_{m1}$  между измерительным и опорным импульсами при исходном положении объекта;

(2) определяется расстояние  $\Delta z_{m2}$  между измерительным и опорным импульсами при смещенном положении объекта;

(3) находится величина смещения (или высоты рельефа) поверхности объекта  $\Delta h = \Delta z_{m2} - \Delta z_{m1}$ .

Величина  $\Delta h$  может определять продольное смещение объекта (вдоль оптической оси сканирующего интерферометра), либо определять рельеф или наклон поверхности объекта при его поперечном смещении  $\Delta x$  относительно оптической оси.

Погрешность определения величины  $\Delta h$  определяется погрешностями определения положений опорного и измерительных интерференционных импульсов в шкале интерференционных осцилляций сигнала  $\tilde{u}_3(\Delta z)$  интерферометра с параллельным лазерным пучком. Нами экспериментально установлено, что величина средней квадратической ошибки среднего значения положения измерительного импульса относительно опорного импульса для объекта с гладкой поверхностью не превышает  $0.5\lambda_3$ . Ожидается, что для объектов с шероховатой поверхностью эта погрешность будет несколько больше и составит порядка  $(1-1,5)\lambda_3$ .

В наших экспериментах для удобства оцифровки и дальнейшей компьютерной обработки выходных сигналов описанной системы трех связанных интерферометров сигнал  $\tilde{u}_2(\Delta z)$  низкокогерентного интерферометра и сигнал  $\tilde{u}_1(\Delta z)$  сканирующего ла-

зерного интерферометра со сфокусированным предметным пучком электрически смешивались и формировали сигнал положения поверхности объекта. Сигнал положения поверхности объекта и интерференционная линейка (сигнала  $\tilde{u}_3(\Delta z)$  интерферометра с параллельным лазерным пучком) синхронно оцифровывались и записывались в виде числовых файлов с помощью двухканальной платы аналого-цифрового преобразования (ЛА-н150-14, ЗАО «Руднев-Шиляев») и программы - регистрирующего осциллографа, поставляемой вместе с этой встраиваемой в компьютер платой АЦП.

На рис. 4 приведены цифровые осциллограммы сигнала положения поверхности объекта (рис. 4а) и интерференционной линейки (рис. 4б). В качестве объекта служило зеркало. Цифрами обозначены: измерительный импульс (1), формирующийся в сигнале  $\tilde{u}_1(\Delta z)$  лазерного сканирующего интерферометра, и опорный импульс (2), формирующийся в сигнале  $\tilde{u}_2(\Delta z)$  низкокогерентного интерферометра.

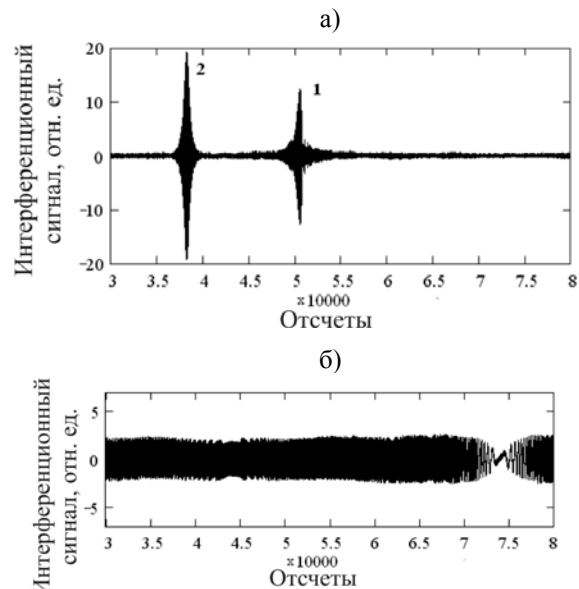


Рис. 4. Цифровые осциллограммы сигнала  $\tilde{u}_1(\Delta z) + \tilde{u}_2(\Delta z)$  положения поверхности объекта (а)

и интерференционной линейки  $\tilde{u}_3(\Delta z)$  (б):

(1) - интерференционный импульс сканирующего лазерного интерферометра (измерительный);

(2) - интерференционный импульс низкокогерентного интерферометра (опорный)

Положение опорного импульса (2) в осциллограмме могло быть изменено путем увеличения или уменьшения оптической разности длин плеч низкокогерентного интерферометра при плавном смещении опорного зеркала (изменении величины  $2\Delta z_{02}$  в формуле (8)). Положение измерительного импульса (1) в осциллограмме менялось при продольном смещении поверхности объекта вдоль оптической оси фокусирующего свет объектива (при изменении расфокусировки  $\Delta z_1$ ).

В силу неравномерности движения сканирующей платформы, как сигнал положения поверхности объекта, так и сигнал интерференционной линейки являлись частотно-модулированными в полосе частот от 0 до 38 кГц. Частота оцифровки этих сигналов с помощью АЦП составляла 1 МГц.

Алгоритм определения расстояния между опорным и измерительным импульсами в шкале смещения  $\Delta z$  сканирующей платформы (или изменения оптической разности хода  $2\Delta z$ ) заключался в следующем. Брался числовой файл осциллограммы интерференционной линейки в виде столбца чисел – значений сигнала, номер  $j$ -ой строки этого столбца совпадал с номером отсчета при оцифровке данного сигнала АЦП, и находились точки перехода этого осциллирующего сигнала через ноль, вернее точки, наиболее близко расположенные к нулевому значению. Для этого все значения перебирались таким образом, что каждый раз в цикле рассматривались и сравнивались по три следующих друг за другом значения сигнала линейки ( $S_{j-1}$ ,  $S_j$  и  $S_{j+1}$ ). За «точку перехода через ноль» бралось то значение сигнала  $S_j$ , соседние с которым значения  $S_{j-1}$  и  $S_{j+1}$ , имеют различные знаки. Номер строки (номер отсчета), содержащей это значение, запоминался. Таким образом формировался столбец номеров отсчета сигнала интерференционной линейки, когда этот сигнал переходит через ноль. Соседние значения этого столбца определяют половину интерференционной осцилляции, т.е. соответствуют смещению сканирующей платформы относительно объекта на величину, равную в шкале этого смещения  $\Delta z = \lambda_3/4$  (или в шкале оптической разности хода  $2\Delta z = \lambda_3/2$ ). В результате становится возможным каждому значению сигнала интерференционной линейки (каждому номеру строки, каждому номеру отсчета) поставить в соответствие определенное значение смещения  $\Delta z$  или разности хода  $2\Delta z$ , зная сколько точек сигнала находится между «точками перехода через ноль» и полагая скорость движения сканирующей платформы постоянной на каждом из участков, равных  $\lambda_3/4$  (на каждой половине интерференционной осцилляции). Поскольку сигнал  $\tilde{u}_1(\Delta z) + \tilde{u}_2(\Delta z)$  положения поверхности объекта и сигнал  $\tilde{u}_3(\Delta z)$  интерференционной линейки оцифровываются и записываются в компьютер синхронно и с одинаковой частотой, то значениям отсчетов сигнала положения поверхности ставятся в соответствие те же значения смещения  $\Delta z$  или разности хода  $2\Delta z$ , что и в сигнале линейки. Таким образом, далее необходимо определить положение опорного и измерительного импульсов уже в шкале смещения  $\Delta z$  сканирующей платформы.

Для этого, как и в случае с сигналом интерференционной линейки  $\tilde{u}_3(\Delta z)$ , в цифровой осциллограмме сигнала положения поверхности объекта  $\tilde{u}_1(\Delta z) + \tilde{u}_2(\Delta z)$  ищутся «точки перехода через ноль»

по описанной выше процедуре. Отличие этого сигнала от сигнала интерференционной линейки заключается в том, что интерференционные осцилляции существуют не на всем протяжении сигнала. Это обуславливает необходимость использования интерференционной линейки для перевода количества отсчетов АЦП в сигнал положения поверхности объекта в смещение  $\Delta z$  или разность хода  $2\Delta z$ , задаваемых движением сканирующей платформы, через длину волны  $\lambda_3$  лазера, используемого в интерферометре с квазипараллельным пучком. При этом длины волн света  $\lambda_1$  и  $\lambda_2$ , используемые в сканирующем лазерном интерферометре с острогофокусированным предметным пучком и низкокогерентном интерферометре, соответственно, могут быть не равны друг другу и длине волны  $\lambda_3$ . В наших экспериментах для создания интерференционной линейки мы использовали излучение полупроводникового лазера с  $\lambda_3 = 0,65$  мкм.

После нахождения «точек перехода через ноль» в сигнале положения поверхности объекта  $\tilde{u}_1(\Delta z) + \tilde{u}_2(\Delta z)$ , на каждом из интервалов между соседними точками «перехода через ноль» значения сигнала брались по модулю, и находилось максимальное значение модуля сигнала, его номер строки (номер отсчета) и соответствующее этому номеру значение смещения  $\Delta z$ , определенное по интерференционной линейке. То есть находились локальные максимумы в сигнале, взятом по модулю, на каждом полупериоде интерференционных осцилляций исходного сигнала. Таким образом, фактически, по вершинам осцилляций снималась огибающая интерференционного сигнала положения поверхности объекта. На рис. 5 приведена огибающая сигнала  $\tilde{u}_1(\Delta z) + \tilde{u}_2(\Delta z)$ , показанного на рис. 4а, построенная в шкале смещения сканирующей платформы  $\Delta z$ . Максимумы на этом графике, обозначенные цифрами (1) и (2), соответствуют измерительному и опорному интерференционным импульсам.

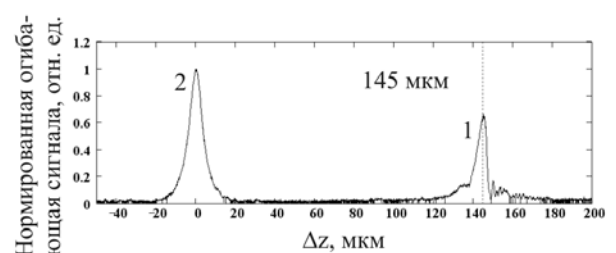


Рис. 5. Огибающая интерференционного сигнала положения поверхности объекта с найденным в шкале смещения  $\Delta z$  сканирующей платформы расстоянием между максимумами (1) и (2), соответствующими измерительному и опорному интерференционным импульсам

Далее по графику этой огибающей находилось расстояние в шкале смещения  $\Delta z$  между максимумами, соответствующими измерительному и опор-

ному интерференционным импульсам. Для этого в матрице значений огибающей находилось максимальное значение среди ее элементов, его номер и соответствующее смещение  $\Delta z$ . Затем исходная матрица нормировалась на это максимальное значение и шкала значений смещения  $\Delta z$  сканирующей платформы смещалась таким образом, чтобы максимальному значению нормированной огибающей соответствовало нулевое значение смещения  $\Delta z$  (рис. 5). Далее осуществлялся поиск значения  $\Delta z_m$  положения второго пика огибающей сигнала в шкале смещения  $\Delta z$  сканирующей платформы.

Этот поиск осуществлялся следующим образом. Программно, по процедуре, сходной с нахождением «точек перехода через ноль», находились значения смещения  $\Delta z$  и соответствующие им номера элементов матрицы значений огибающей, нормированной описанным выше способом, соответствующие значению 0,5 от максимального (равно 1). Таких значений получается два ( $\delta z_1 < 0$  и  $\delta z_2 > 0$ ,  $|\delta z_1| \approx |\delta z_2|$ ) – в обе стороны от максимального значения в шкале смещения  $\Delta z$ . Величина  $|\delta z_1| + |\delta z_2|$  приблизительно равняется  $l_c$  или  $L_c$ , в зависимости от того, какой из интерференционных импульсов, опорный или измерительный был больше по амплитуде. Вообще, перед началом измерительных экспериментов опорный и измерительный импульсы разводятся в осциллограмме на расстояние, много превышающее сумму  $l_c + L_c$ , во избежание наложения этих импульсов друг на друга. Добиться этого можно изменением длины одного из плеч низкокогерентного интерферометра (изменяя  $2\Delta z_{02}$ ).

Далее в матрице значений нормированной огибающей находились номера элементов, для которых смещение  $\Delta z$  приблизительно равно  $2\delta z_1$  и  $2\delta z_2$ . Этого достаточно, чтобы значения огибающей в этих точках существенно упали по сравнению с максимальным. После этого производился поиск максимальных значений нормированной огибающей среди элементов с номерами от одного, до номера, которому соответствует смещение  $\approx 2\delta z_1$ , и среди элементов с номерами, начиная с номера, соответствующего смещению  $\approx 2\delta z_2$  до максимального номера. При этом фиксировались значения смещения  $\Delta z$  ( $\Delta z' < 0$ ,  $\Delta z'' > 0$ ), соответствующие этим двум значениям нормированной огибающей. Затем эти значения нормированной огибающей сравнивались, выбиралось наибольшее, и величина абсолютного значения смещения  $|\Delta z'|$  или  $|\Delta z''|$ , соответствующего большему значению огибающей, принималась за искомое расстояние  $\Delta z_m$  между опорным и измерительным максимумами.

По описанному выше алгоритму найдено расстояние между максимумами огибающей в шкале смещения сканирующей платформы, график которой приве-

ден на рис.5. Найденное положение второго максимума отмечено на этом рисунке штриховой меткой.

В качестве примера измерительных возможностей системы приведены результаты измерения расстояния  $\Delta z_m$  между опорным и измерительным импульсами в сигнале  $\tilde{u}_1(\Delta z) + \tilde{u}_2(\Delta z)$  в шкале смещения сканирующей платформы при смещении  $\Delta x$  зеркального объекта в направлении, поперечном оптической оси предметного пучка (рис. 6). Поперечное смещение  $\Delta x$  осуществлялось с помощью микрометрического столика, цена деления шкалы микрометрического винта которого составляла 10 мкм.

Кружками на рис.6 обозначены значения  $\Delta z_m$ , усредненные по 10 измерениям. Вертикальные отрезки показывают доверительный интервал полученных средних значений  $\Delta z_m$  (для доверительной вероятности  $P = 0,99$  и числа измерений  $k = 10$  по распределению Стьюдента). Пунктирная прямая является результатом линейной регрессии полученных экспериментальных данных. Наклон этой прямой позволяет определить угол наклона поверхности плоского зеркала, служившего объектом, по отношению к плоскости, перпендикулярной оптической оси фокусирующего свет объектива в предметном плече сканирующего интерферометра. Этот угол наклона, определенный по графику на рис. 6 составляет  $0,3^0$  (18 угловых минут).

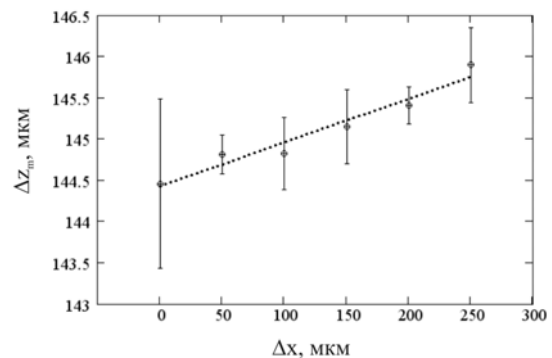


Рис. 6. Результаты измерений расстояния  $\Delta z_m$  между опорным и измерительным максимумами в сигнале положения поверхности объекта при поперечном смещении  $\Delta x$  плоского зеркального объекта

Рассматриваемая система, как отмечалось выше, может быть использована для контроля толщины слоев слоистых объектов [27]. В этом случае сигнал сканирующего интерферометра с остророфокусированным пучком будет содержать последовательность интерференционных импульсов, положение которых в шкале разности хода будет определяться толщинами слоев. Однако, в отличие от низкокогерентной интерферометрии, положение этих импульсов определяется не оптической толщиной слоев  $2n_j h_j$  ( $n_j$  - показатель преломления слоя,  $h_j$  - геометрическая толщина слоя), а отношением  $2h_j/n_j$ .



### Заключение

В рамках настоящей работы показано, что лазерный интерферометр с остророфокусированным зондирующим пучком и интегрирующей апертурой фотоприемника наравне с конфокальной микроскопией и низкокогерентной интерферометрией может служить надежным средством прецизионного контроля формы рельефа поверхности и параметров структуры слоистых объектов. Основные достоинства данного интерферометра заключаются: в возможности использования достаточно мощных лазерных источников и, соответственно, в получении сигнала достаточной величины при контроле сильно рассеивающих сред, когда имеют место большие энергетические потери; в существенно более низких требованиях к равенству оптических путей в плечах интерферометра; в более высокой поперечной и продольной разрешающих способностях. Немаловажным обстоятельством является более выгодное соотношение стоимостей источников излучения – суперлюминесцентные светодиоды, используемые в низкокогерентной интерферометрии, существенно дороже полупроводниковых лазерных модулей. Кроме этого, применение лазерных модулей коротковолнового излучения обеспечивает более высокую точность измерений.

Рассмотренная в настоящей работе интерференционная система достаточно надежна в эксплуатации вне лабораторных условий. Эта система может быть использована для размерного контроля формы и слоистой структуры объектов технического происхождения, а также в диагностических целях в биомедицине.

Работа выполнена при поддержке грантов РФФИ № 05-08-50318-а, CRDF № Y2-BEP-06-17 (REC-006, ANNEX BF4M06) и CRDF RUX0-006-SR-06 (ANNEX BP1M06).

### Литература

1. Коломийцов Ю.В. Интерферометры. Основы инженерной теории. Применения // Л.: Машиностроение, 1976.
2. Wyant J.C. Interferometric optic metrology: basic principles and new systems // Laser Focus, 1982. V.18. P. 65-71.
3. Батраков А.С., Бутусов М.М., Гречка Г.П. и др. Лазерные измерительные системы // М.: Радио и связь, 1981.
4. Дубнищев Ю.Н., Ринкевичус Б.С. Методы лазерной доплеровской анемометрии // М.: Наука, 1982.
5. Коронкевич В.П., Соболев В.С., Дубинцев Ю.Н. Лазерная интерферометрия // Новосибирск: Наука, 1983.
6. Аблеков В.К., Колядин С.А., Фролов А.В. Высокорастворимые оптические системы // М.: Машиностроение, 1985.
7. Чудов В.А. Измерения в машиностроении // Измерительная техника, 1990. №3. С.61-62.
8. Васильев В.Н., Гуров И.П. Оптическая интерферометрия и информационные технологии. Системы прецизионного технологического контроля // Известия вузов. Приборостроение, 1996. №5-6. С.13-20.
9. Васильев В.Н., Гуров И.П. Технология бесконтактного контроля объектов на основе когерентного и спектрального радаров в биомедицинских исследованиях и промышленности, в кн.: Оптические и лазерные технологии // СПб.: СПбГУ ИТМО, 2002.
10. Гуров И.П., Джабиев А.Н. Интерферометрические системы дистанционного контроля объектов // СПб.: СПбГУ ИТМО, 2000.
11. Wilson T., Sheppard C.J.R. Theory and Practice of Scanning Optical Microscopy // London: Academic Press, 1984.
12. Wilson T. ed. Confocal Microscopy // London: Academic Press, 1990.
13. Ченцов Ю.В. Конфокальная лазерная сканирующая микроскопия в биологии и медицине // Оптический журнал, 1994. №12. С.18-23.
14. Лужнев Э.И., Попова И.П., Кузьмин С.В., Слащев С.М. Конфокальная лазерная сканирующая микроскопия: принципы, устройство, применение (Часть 1) // Научное приборостроение, 2001. Т.11. №2. С.3-20.
15. Hamilton D.K., Sheppard C.J.R. A Confocal Interference Microscope // Optica Acta, 1982. V. 29. N. 12. P. 1573-1577.
16. Matthews H.J., Hamilton D.H., Sheppard C.J.R. Surface profiling by phase-locked interferometry // Applied Optics, 1986. V. 25. N. 14. P. 2372-2374.
17. Gu M. Time-resolved three-dimensional imaging based on confocal interferometry under ultrashort pulsed illumination // Optik, 1996. V. 104. N. 1. P. 32-34.
18. Fercher A.F. Optical coherence tomography // J. Biomed. Opt., 1996. V. 1. P. 157-173.
19. Schmitt J.M. Optical coherence tomography: a review // IEEE J. Select Topics Quant. Electron., 1999. V. 5. P. 1205-1215.
20. Masters B.R. ed. Optical low-coherence reflectometry and tomography // SPIE Milestone Series, 2001. V. MS165.
21. Fercher A. F., Drexler W., Hitzinger C. K., Lasser T. Optical coherence tomography - principles and applications // Report Prog. Phys., 2003. N. 66. P. 239-303.
22. Bouma B.E. and Tearney G.J. eds. Handbook of optical coherence tomography // NY: Marcel Dekker Inc. 2002.
23. Гуров И.П. Оптическая когерентная томография: принципы, проблемы и перспективы // Проблемы когерентной и нелинейной оптики. Под ред. Гурова И.П. и Козлова С.А., СПб.: СПбГУ ИТМО. 2004. С. 6-30.
24. Рябухо В.П., Хомутов В.Л., Лякин Д.В., Константинов К.В. Лазерный интерферометр с остророфокусированными пучками для контроля пространственного положения объекта // Письма в ЖТФ, 1998. Т. 24. В. 4. С. 19-24.
25. Kempe M., Rudolph W. Scanning microscopy through thick layers based on linear correlation // Opt. Lett., 1994 V. 19. N. 23. P. 1919-1921.
26. Борн М., Вольф Э. Основы оптики // М.: Наука, 1973.
27. Лякин Д.В., Лобачев М.И., Резчиков А.Ф., Рябухо В.П., Миненкова И.Ф. Лазерная сканирующая интерференционная система для определения толщины слоистых микроструктур // Мехатроника, автоматизация, управление, 2003. №4. С.10-14.

# Laser interferometer with fine-focused beam in a system of three coupled interferometers

*D.V. Lyakin<sup>1,2</sup>, V.V. Lychagov<sup>1,2</sup>, V.P. Ryabukho<sup>1,2</sup>, M.I. Lobachev<sup>1,2</sup>*  
*<sup>1</sup>Institute of Precision Mechanics and Control, the Russian Academy of Sciences*  
*<sup>2</sup>Saratov State University*

## Abstract

The study analyzes a system of coupled interferometers — one measuring interferometer and two auxiliary interferometers built according to the Michelson scheme to monitor the spatial position (shape) of an object or the parameters of layered structures. The measuring interferometer functions based on the effect of matching the interfering fields and generates an interference focus coincidence pulse of the probe laser beam with the controlled surface. The auxiliary low-coherent interferometer forms a reference interference pulse, with respect to which the position of the measuring pulse in the path difference scale is determined. An auxiliary laser interferometer is used for this purpose. The study looks into the theory of interferometers, scheme solutions and computer signal processing algorithms. Experimental results are provided, the accuracy of measurements is analyzed.

**Keywords:** laser interferometry, fine-focused beam, spatial position (shape) of an object

**Citation:** Lyakin DV, Lychagov VV, Ryabukho VP, Lobachev MI. Laser Interferometer with Fine-Focused Beam in a System of Three Coupled Interferometers. *Computer Optics* 2006; 30: 53-61.

**Acknowledgements:** This work was supported by RFBR grants No. 05-08-50318-a, CRDF No. Y2-BEP-06-17 (REC-006, ANNEX BF4M06) and CRDF RUX0-006-SR-06 (ANNEX BP1M06).

## References

- [1] Kolomiytsov YuV. Interferometers: Fundamentals of engineering theory, application [In Russian]. Leningrad: "Mashinostroenie" Publisher; 1976.
- [2] Wyant JC. Interferometric optical metrology: basic principles and new systems. *Laser Focus* 1982; 18: 65-71.
- [3] Batrakov AS, Butusov MM, Grechka GP, Kornienko AA, Lukjanov DP. Laser measuring systems [In Russian]. Moscow: "Radio i Svyaz" Publisher; 1981.
- [4] Dubnischev YuN, Rinkevichus BS. Laser Doppler anemometry methods [In Russian]. Moscow: "Nauka" Publisher; 1982.
- [5] Koronkevich VP, Sobolev VS, Dubintsev YuN. Laser interferometry [In Russian]. Novosibirsk: "Nauka" Publisher; 1983.
- [6] Ablekov VK, Kolyadin SA, Frolov AV. High-resolution optical systems [In Russian]. Moscow: "Mashinostroenie" Publisher; 1985.
- [7] Chudov VA. Engineering measurements [In Russian]. *Measurement Techniques* 1990; 3: 61-62.
- [8] Vasilyev VN, Gurov IP. Optical interferometry and information technology. Precision process control systems [In Russian]. *Journal of Instrument Engineering* 1996; 5-6: 13-20.
- [9] Vasilyev VN, Gurov IP. Technology of contactless control of objects based on coherent and spectral radars in biomedical research and industry. In Book: Vasilyev VN, ed. *Optical and laser technologies* [In Russian]. Saint-Petersburg: "SPbGU ITMO" Publisher; 2002.
- [10] Gurov IP, Dzhabiev AN. Interferometric systems for distance testing of objects [In Russian]. Saint-Petersburg: "SPbGU ITMO" Publisher; 2000.
- [11] Wilson T, Sheppard CJR. Theory and practice of scanning optical microscopy. London: Academic Press; 1984. ISBN: 978-0-12-757760-9.
- [12] Wilson T, ed. *Confocal microscopy*. London: Academic Press; 1990. ISBN: 978-0-12-757270-3.
- [13] Chentsov YuV. The confocal laser scanning microscopy in biology and medicine [In Russian]. *J Opt Technol* 1994; 12: 18-23.
- [14] Lezhnev EI, Popova II, Kuzmin SV, Slashchev SM. Confocal laser scanning microscopy: Principles, arrangement, application (Part 1) [In Russian]. *Nauchnoe Priborostroenie* 2001; 11(2): 3-20.
- [15] Hamilton DK, Sheppard CJR. A confocal interference microscope. *Optica Acta* 1982; 29(12): 1573-1577. DOI: 10.1080/713820806.
- [16] Matthews HJ, Hamilton DH, Sheppard CJR. Surface profiling by phase-locked interferometry. *Appl Opt* 1986; 25(14): 2372-2374. DOI: 10.1364/AO.25.002372.
- [17] Gu M. Time-resolved three-dimensional imaging based on confocal interferometry under ultrashort pulsed illumination. *Optik* 1996; 104(1): 32-34.
- [18] Fercher AF. Optical coherence tomography. *J Biomed Opt* 1996; 1(2): 157-173. DOI: 10.1117/12.231361.
- [19] Schmitt JM. Optical coherence tomography (OCT): a review. *IEEE J Select Topics Quant Electron* 1999; 5(4): 1205-1215. DOI: 10.1109/2944.796348.
- [20] Masters BR, ed. *Selected papers on optical low-coherence reflectometry and tomography*. SPIE Press; 2001. ISBN: 978-0-8194-3837-9.
- [21] Fercher AF, Drexler W, Hitzenberger CK, Lasser T. Optical coherence tomography – principles and applications. *Report Prog Phys* 2003; 66(2): 239-303. DOI: 10.1088/0034-4885/66/2/204.

- [22] Bouma BE, Tearney GJ, eds. Handbook of optical coherence tomography. New York: Marcel Dekker Inc; 2002. ISBN: 978-0-8247-0558-9.
- [23] Gurov IP. Optical coherent tomography: principles, problems and prospects [In Russian]. In Book: Gurov IP, Kozlov SA, eds. Problems of coherent and nonlinear optics. Saint-Petersburg: "SPbGU ITMO" Publisher; 2004: 6-30.
- [24] Ryabukho VP, Khomutov VL, Lyakin DV, Konstantinov KV. Laser interferometer with fine-focused beams to monitor the spatial position of an object. Tech Phys Lett 1998, 24(2): 132-134. DOI: 10.1134/1.1262023.
- [25] Kempe M, Rudolph W. Scanning microscopy through thick layers based on linear correlation. Opt Lett 1994; 19(23): 1919-1921. DOI: 10.1364/OL.19.001919.
- [26] Born M, Wolf E. Principles of optics: Electromagnetic theory of propagation, interference and diffraction of light. 6<sup>th</sup> ed. Oxford, New York: Pergamon Press; 1980. ISBN: 978-0-08-026481-3.
- [27] Lyakin DV, LobachevMI, RezhnikovAF, Ryabukho VP, Minenkova IF. Laser scanning interference system to determine the thickness of layered microstructures [In Russian]. Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie 2003; 4: 10-14.