

**НИЗКОКОГЕРЕНТНАЯ АВТОКОРРЕЛЯЦИОННАЯ  
ИНТЕРФЕРОМЕТРИЯ СЛОИСТЫХ ОБЪЕКТОВ\***

**В. В. Лычагов<sup>1</sup>, Д. В. Лякин<sup>2</sup>, М. Д. Модель<sup>3</sup>, В. П. Рябухо<sup>1</sup>**

<sup>1</sup>*Саратовский государственный университет им. Н. Г. Чернышевского, г. Саратов  
E-mail: lychagov@optics.sgu.ru*

<sup>2</sup>*Институт проблем точной механики и управления РАН, г. Саратов*

<sup>3</sup>*Гарвардская медицинская школа, г. Бостон, США*

Рассматривается новый метод низкокогерентной интерферометрии, когда оптическое поле, отраженное слоистым объектом, направляется в сканирующий интерферометр продольного сдвига для автокорреляционного анализа. В этом методе объект исследования располагается вне интерферометра и не используется опорный пучок света. Описана теория метода, выполнено численное моделирование и представлены результаты натурального эксперимента для слоистых объектов.

**Введение.** Последнее время активно развиваются методы низкокогерентной интерферометрии (НКИ) слоистых и рассеивающих объектов технического и биологического происхождения [1–13]. В таких методах используются широкополосные источники света с малой длиной временной когерентности, определяющей пространственное разрешение этих методов.

В классическом исполнении метода НКИ с опорным пучком света объект контроля располагается в одном из плеч интерферометра (как правило, интерферометра Майкельсона), на выходе которого наблюдается сигнал интерференции объектного оптического поля и специального опорного пучка света [1–5, 10, 11]. Использование опорной волны создает ряд проблем в практическом использовании таких интерференционных схем. В частности, необходимо обеспечивать равенство оптических длин путей в плечах интерферометра с точностью до диапазона сканирования опорного зеркала интерферометра. Следовательно, ограничивается расстояние между контролируемым объектом и интерферометром, а также возникают трудности при контроле движущихся объектов.

Эти проблемы преодолеваются в так называемом двухлучевом методе НКИ, когда контролируемый объект вынесен за пределы интерферометра и

\* Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (грант № 05-08-65514-а) и CRDF (грант RUX0-006-SR-06 (ANNEX BP1M06)).

освещается низкокогерентным световым полем, формируемым на выходе интерферометра [4, 7, 9, 10, 12, 13]. Здесь интерферометр выполняет роль осветительной системы, формирующей оптический пучок с управляемыми продольными когерентными свойствами. В спектральном методе НКИ без использования опорного пучка контролируемый объект также может находиться на произвольном расстоянии от системы регистрации сигнала [6, 8–10]. В такой системе объектное низкокогерентное поле подвергается спектральному анализу: сигнал интерференции наблюдается на выходе спектрального прибора.

В представленной работе рассматривается новый подход в НКИ и соответственно новая интерференционная система реализации этого метода измерения, которая расширяет практические и функциональные возможности низкокогерентной интерферометрии. В данной системе не используется специальный опорный пучок света. Объект освещается низкокогерентным оптическим полем непосредственно от источника света, а отраженное объектом поле – объектное низкокогерентное световое поле – подвергается корреляционному анализу с помощью сканирующего интерферометра Майкельсона, на вход которого направляется это объектное световое поле. Интерферометр в такой системе вместе с фотодетектором служит системой автокорреляционного анализа низкокогерентного объектного поля. На выходе системы формируется интерференционный сигнал автокорреляции продольной (вдоль направления освещения) структуры объекта. Предлагаемая беспорядочная интерференционная система имеет ряд практических и функциональных преимуществ перед известными системами НКИ, в особенности для исследования и контроля структуры слоистых объектов.

**Теоретические основы метода.** Оптическая схема автокорреляционной НКИ показана на рис. 1. Контролируемый объект LO с объемной слоистой структурой освещается световым пучком с малой длиной временной когерентности от источника SLD. BS1 и BS2 – делители пучков света. Полное световое поле, отраженное всей объемной структурой объекта, направляется на вход интерферометра Майкельсона MI с плоскими зеркалами M1 и M2.

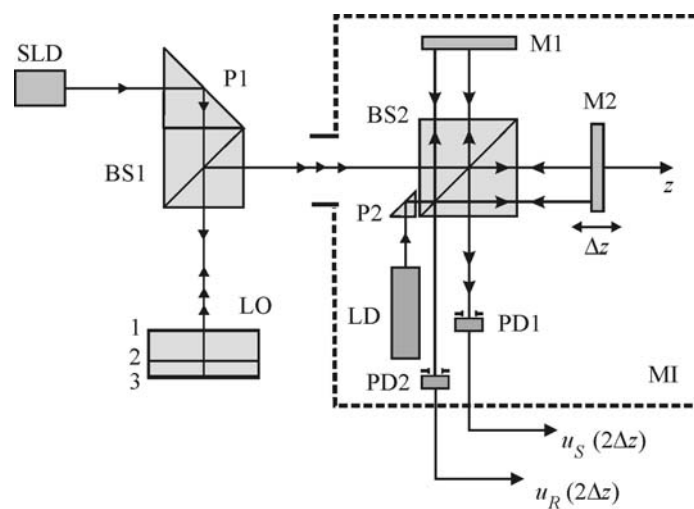


Рис. 1. Схема автокорреляционной низкокогерентной интерферометрии слоистого объекта

Одно из зеркал интерферометра имеет возможность прецизионного контролируемого смещения  $\Delta z$  вдоль оптической оси  $z$ . Измерение величины  $\Delta z$  может быть произведено в лазерном канале этого же интерферометра, включающего в себя лазерный диод LD, поворотную призму P2 и фотоприемник PD2. С помощью интерферометра и фотодетектора PD1 формируется сигнал  $u_S(2\Delta z)$  автокорреляции продольной структуры объектного светового поля и соответственно оптической структуры объекта по глубине, вдоль направления освещения. Такой сигнал отчетливо отражает слоистую структуру объекта, если длина временной когерентности освещающего объект поля существенно меньше удвоенной оптической толщины слоев. Выходной сигнал  $u_R(2\Delta z)$  лазерного канала интерферометра несет информацию о величине смещения  $\Delta z$ .

Низкокогерентное световое поле, отраженное слоистым объектом, в котором приближении можно рассматривать как временную последовательность идентичных (взаимно когерентных) волновых цугов, отраженных различными границами продольной структуры объекта. Взаимное временное запаздывание  $\Delta t_{jk}$  этих цугов определяется оптической толщиной слоев  $n_{jk} d_{jk}$  структуры контролируемого объекта и их комбинациями. В интерферометре это временное запаздывание может быть компенсировано соответствующим продольным смещением  $\Delta z_{jk}$  зеркала интерферометра,  $\Delta z_{jk} = c \Delta t_{jk} / 2$ , где  $c$  – скорость света. В результате компенсации при непрерывном сканировании зеркала фотодетектор PD1 на выходе интерферометра должен зарегистрировать интерференционный импульс временной когерентности. Такие интерференционные импульсы будут возникать при компенсации временной задержки каждой пары волновых цугов, отраженных границами слоев объемной структуры контролируемого объекта.

Проанализируем процесс формирования интерференционного сигнала в рассматриваемой системе для прозрачного слоистого объекта с резкими отражающими границами слоев. Для простоты будем полагать, что структура объекта имеет всего три отражающие границы, комплексные коэффициенты отражения которых запишем в виде  $\rho_1 = \rho_{01} \exp(i\varphi_1)$ ,  $\rho_2 = \rho_{02} \exp(i\varphi_2)$ ,  $\rho_3 = \rho_{03} \exp(i\varphi_3)$ . Тогда для напряженности электрического поля отраженной объектной световой волны  $E_{\Sigma}(z, t)$ , распространяющейся вдоль оси  $z$ , без учета возможного многократного отражения на границах раздела сред можем записать следующее выражение:

$$E_{\Sigma}(z, t) = \rho_1 E_0(z, t) + (1 - \rho_{01})^2 \rho_2 E_0(z, t - \Delta t_{12}) + (1 - \rho_{01})^2 (1 - \rho_{02})^2 \rho_3 E_0(z, t - \Delta t_{13}) = \sum_{j=1}^3 C_j E_0(z, t - \Delta t_{1j}), \quad (1)$$

где  $E_0(z, t) = U_0(z, t) \exp(i\omega_0 t)$  – напряженность поля, освещающего объект;  $\omega_0$  – центральная циклическая частота поля;  $j$  – номер отражающей границы в структуре объекта;  $\Delta t_{1j}$  – взаимные временные запаздывания волновых возмущений, отраженных 1-й и  $j$ -й границами;  $C_j$  – комплексные коэффициенты, учитывающие отражающие свойства границ слоев структуры объекта:  $C_1 = \rho_1$ ,  $C_2 = (1 - \rho_{01})^2 \rho_2$ ,  $C_3 = (1 - \rho_{01})^2 (1 - \rho_{02})^2 \rho_3$ .

Объектная световая волна  $E_{\Sigma}(z, t)$  направляется в сканирующий интерферометр Майкельсона, в котором реализуется взаимная временная задержка  $\tau = 2\Delta z / c$  между двумя идентичными частями этой волны путем продоль-

ного смещения  $\Delta z$  одного из зеркал интерферометра из положения равенства длин плеч интерферометра. Интенсивность оптического поля на выходе интерферометра можно записать в виде

$$I(\tau) \sim \left\langle \left| E_{\Sigma}(z, t) + E_{\Sigma}^*(z, t - \tau) \right|^2 \right\rangle = \\ = \left\langle |E_{\Sigma}(z, t)|^2 \right\rangle + \left\langle |E_{\Sigma}(z, t - \tau)|^2 \right\rangle + 2\text{Re} \left\{ \left\langle E_{\Sigma}(z, t) E_{\Sigma}^*(z, t - \tau) \right\rangle \right\}, \quad (2)$$

где два первых слагаемых определяют интенсивность интерферирующих волн, а третье слагаемое – функцию временной когерентности объектного светового поля  $\Gamma_{\Sigma}(\tau) = \left\langle E_{\Sigma}(t) E_{\Sigma}^*(t - \tau) \right\rangle$ ;  $\langle \dots \rangle$  – усреднение по ансамблю реализаций волновых возмущений [14, 15]. Эта функция когерентности не совпадает с функцией когерентности освещающего объект поля, поскольку рассматривается объект с объемной отражающей структурой. В результате объемного отражения возникают временные задержки колебаний, соответствующие глубине залегания отражающей структуры объекта, и когерентные свойства отраженного оптического поля модифицируются (см., например, [15, 16]). Используя (1), для  $\Gamma_{\Sigma}(\tau)$  можно получить следующее выражение:

$$\Gamma_{\Sigma}(\tau) = \sum_{j=1}^3 |C_j|^2 \Gamma(\tau) + C_1 C_2^* \Gamma(\tau + \Delta t_{12}) + C_1^* C_2 \Gamma(\tau - \Delta t_{12}) + \\ + C_1 C_3^* \Gamma(\tau + \Delta t_{13}) + C_1^* C_3 \Gamma(\tau - \Delta t_{13}) + C_2 C_3^* \Gamma(\tau + \Delta t_{23}) + C_2^* C_3 \Gamma(\tau - \Delta t_{23}), \quad (3)$$

где

$$\Gamma(\Delta t) = \left\langle E_0(t) E_0^*(t - \Delta t) \right\rangle = \left\langle U_0(t) U_0^*(t - \Delta t) \right\rangle \exp(i\omega_0 \Delta t) = \Gamma_U(\Delta t) \exp(i\omega_0 \Delta t)$$

– функция временной когерентности исходного светового поля источника – светового поля, освещающего объект;  $\Gamma_U(\Delta t)$  – функция временной когерентности комплексной амплитуды (комплексной огибающей) освещающего поля [14, 15].

Функцию временной когерентности  $\Gamma(\Delta t)$  можно представить в эквивалентной форме  $\Gamma(\Delta)$ , где  $\Delta = c\Delta t$  – оптическая разность хода волновых возмущений. Тогда для переменной составляющей выходного сигнала интерферометра  $u_S(2\Delta z)$ , определяемой третьим слагаемым в (2), можем записать выражение

$$u_S(2\Delta z) \sim \text{Re} \{ \Gamma_{\Sigma}(\tau) \} = \sum_{j=1}^3 |C_j|^2 |\Gamma(2\Delta z)| \cos \left( \frac{2\pi}{\lambda_0} 2\Delta z \right) + \\ + |C_1 C_2^*| \left| \Gamma(2\Delta z \pm 2d_{12} n_{12}) \right| \cos \left( \frac{2\pi}{\lambda_0} 2\Delta z \pm \frac{2\pi}{\lambda_0} 2d_{12} n_{12} + \varphi_1 - \varphi_2 \right) + \\ + |C_1 C_3^*| \left| \Gamma(2\Delta z \pm (2d_{12} n_{12} + 2d_{23} n_{23})) \right| \times$$

$$\begin{aligned} & \times \cos\left(\frac{2\pi}{\lambda_0} 2\Delta z \pm \frac{2\pi}{\lambda_0} (2d_{12}n_{12} + 2d_{23}n_{23}) + \varphi_1 - \varphi_3\right) + \\ & + |C_2 C_3^*| \left| \Gamma(2\Delta z \pm 2d_{23}n_{23}) \right| \cos\left(\frac{2\pi}{\lambda_0} 2\Delta z \pm \frac{2\pi}{\lambda_0} 2d_{23}n_{23} + \varphi_2 - \varphi_3\right), \quad (4) \end{aligned}$$

где  $\tau = 2\Delta z/c$ ;  $\Delta t_{kj} = 2d_{kj}n_{kj}/c$ ;  $d_{kj}n_{kj}$  – оптическая толщина слоя между  $k$ -й и  $j$ -й границами;  $\lambda_0 = 2\pi c/\omega_0$ . Согласно (4) имеем быстро осциллирующий в шкале разности хода  $\Delta = 2\Delta z$  интерференционный сигнал, определяемый косинусоидальным сомножителем  $\cos(2\pi 2\Delta z/\lambda_0)$  и модулированный функциями когерентности  $\Gamma(2\Delta z \pm \Delta_j)$ , где  $\Delta_j$  – оптическая разность хода волн, вносимая соответствующими слоями объекта. Если пренебречь постоянными (не зависящими от  $\Delta z$ ) фазовыми сдвигами  $(2\pi/\lambda_0)2d_{jk}n_{jk}$  и  $\varphi_j$ , то косинусоидальный сомножитель  $\cos(2\pi 2\Delta z/\lambda_0)$ , определяющий несущую частоту осцилляций сигнала, можно вынести за скобки в (4).

Выражение (4) показывает, что переменная составляющая выходного сигнала интерферометра  $u_s(2\Delta z)$  содержит семь интерференционных импульсов временной когерентности источника света в шкале разности хода волн  $\Delta = \pm 2\Delta z$  в интерферометре. Положение максимумов этих импульсов определяется условием равенства нулю аргумента функции когерентности  $\Gamma(\Delta)$ , поскольку  $\Gamma(\Delta = 0) = I_0 = \max$ . Центральный импульс, наблюдаемый при  $2\Delta z = 0$  (первое слагаемое в уравнении (4)), соответствует нулевой разности хода в интерферометре. Он не несет информацию о продольной структуре объектного светового поля и соответственно о структуре объекта.

Симметрично относительно центрального импульса располагаются по три боковых импульса, положение которых в шкале разности хода  $\Delta = 2\Delta z$  определяется оптической толщиной двух слоев объекта и их комбинацией:

$$\pm 2\Delta z_{12} = 2d_{12}n_{12}; \quad \pm 2\Delta z_{13} = 2d_{12}n_{12} + 2d_{23}n_{23}; \quad \pm 2\Delta z_{23} = 2d_{23}n_{23}. \quad (5)$$

Амплитуды этих боковых импульсов определяются коэффициентами отражения границ соответствующего слоя и коэффициентами отражения границ на пути распространения света внутри объекта. Таким образом, на амплитуду интерференционного импульса когерентности влияют не только коэффициенты отражения границ соответствующего слоя объекта, но и коэффициенты отражения всех границ, через которые проходят интерферирующие волны.

**Численное моделирование интерференционного сигнала.** Выражение (4) было использовано для моделирования выходного сигнала интерферометра в зависимости от различных параметров слоистого объекта: геометрической толщины, показателя преломления слоев, коэффициентов отражения границ слоев и длины когерентности зондирующего оптического излучения. При моделировании использовались параметры структуры слоистых объектов, идентичные параметрам реальных объектов, исследовавшихся в эксперименте.

Модуль функции временной когерентности источника света представлялся в форме гауссовой функции  $\Gamma(\Delta) = I_0 \exp(-\Delta^2/l_c^2)$ , где  $l_c$  – длина временной когерентности. В частности, полагалось  $l_c = 15$  мкм,  $\lambda_0 = 0,665$  мкм.

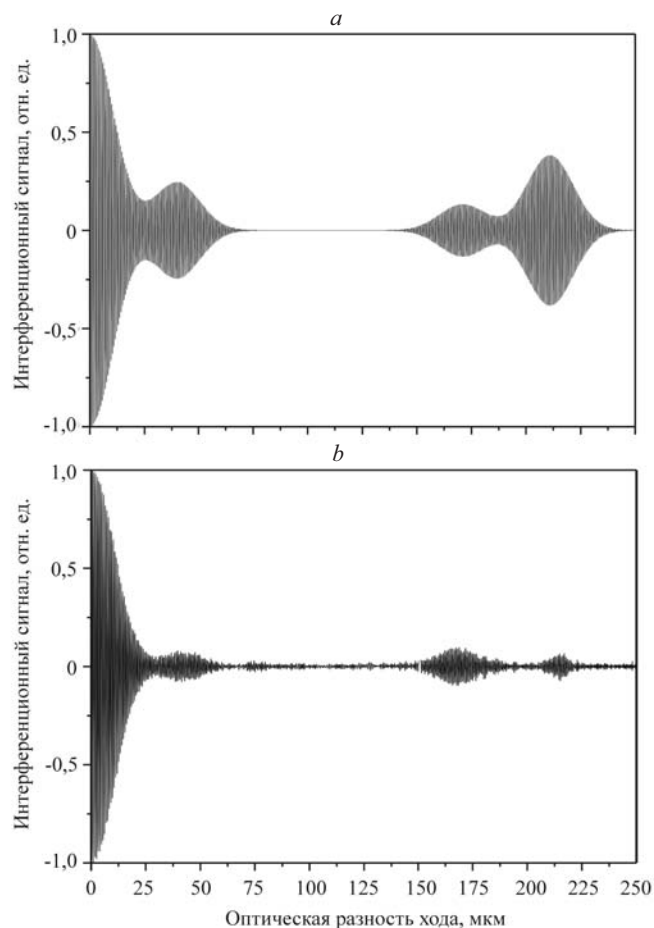


Рис. 2. Интерференционные сигналы низкокогерентного автокорреляционного интерферометра для объекта с двумя слоями – полимерной пленки, наклеенной на поверхность металлического зеркала: теоретический (*a*) и экспериментальный (*b*)

Графические формы переменной составляющей интерференционного сигнала для случая двух слоев (трех отражающих границ) представлены на рис. 2, *a* и рис. 3, *a* (показаны центральный и боковые интерференционные импульсы в шкале только положительной разности хода). Для слоистого объекта, интерференционный сигнал от которого представлен на рис. 2, *a*, приняты следующие значения параметров:  $d_{12} = 55$  мкм,  $n_{12} = 1,5$ ,  $d_{23} = 15$  мкм,  $n_{23} = 1,3$ . Сигнал, представленный на рис. 3, *a*, получен для объекта с параметрами:  $d_{12} = 60$  мкм,  $n_{12} = 1,5$ ,  $d_{23} = 180$  мкм,  $n_{23} = 1,0$ . Указанные значения геометрических толщин слоев установлены с использованием соотношений (5) на основе экспериментального определения положения соответствующих импульсов в шкале разности хода в интерференционных сигналах. Эти экспериментальные сигналы представлены на рис. 2, *b* и рис. 3, *b*. Значения амплитудных коэффициентов отражения границ слоев принимались в обоих случаях  $\rho_{01} = 0,2$ ,  $\rho_{02} = 0,2$ ,  $\rho_{03} = 0,8$ .

В экспериментах использовалась оптическая система на основе интерферометра Майкельсона (см. рис. 1) с зеркалом, сканирующим с частотой

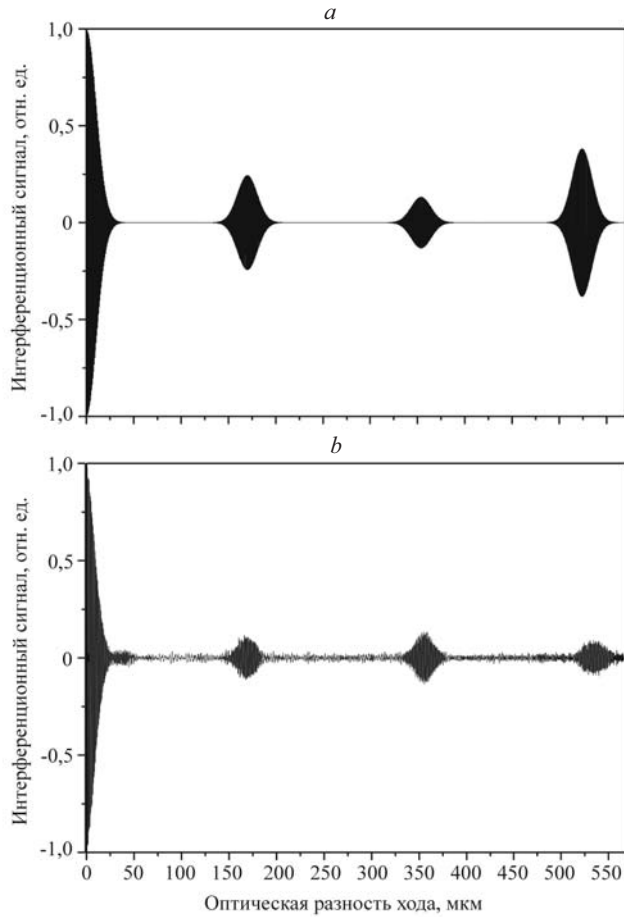


Рис. 3. Интерференционные сигналы низкокогерентного автокорреляционного интерферометра для объекта с двумя слоями – пластины слюды, лежащей на поверхности металлического зеркала: теоретический (а) и экспериментальный (б)

$f_0 \approx 1$  Гц и амплитудой  $I_0 \approx 1$  мм, существенно превышающей оптическую толщину слоев объемной структуры контролируемого объекта. Объектами контроля являлись тонкие прозрачные и рассеивающие стеклянные, слюдяные и полимерные пластины и пленки толщиной  $d_{12} \approx 40-150$  мкм отдельно и расположенные на металлическом зеркале для образования второго слоя – клеевого слоя или воздушного зазора между пленкой или пластиной и поверхностью зеркала. Низкокогерентным источником света служил суперлюминесцентный диод с длиной волны  $\lambda_0 = 0,665$  мкм и длиной временной когерентности излучения  $l_c \approx 15$  мкм.

Для измерения смещения  $\Delta z$  сканирующего зеркала интерферометра служил вспомогательный лазерный канал, включающий в себя лазерный диод LD с длиной волны  $\lambda_L \approx 0,65$  мкм и фотоприемник PD2 (см. рис. 1). Сигнал лазерного интерферометра  $u_R(2\Delta z)$  использовался в качестве шкалы отсчета с ценой деления  $\lambda_L/2$ . Фотоэлектрические сигналы  $u_S(2\Delta z)$  и  $u_R(2\Delta z)$  интерферометра оцифровывались с помощью платы аналого-цифрового преоб-

разования. Автокорреляционный сигнал  $u_s(2\Delta z)$  подвергался цифровой частотной фильтрации для увеличения соотношения сигнал/шум.

Экспериментальные цифровые осциллограммы выходного сигнала интерферометра, представленные в шкале положительной разности хода волн в интерферометре  $2\Delta z$ , приведены на рис. 2, *b* и рис. 3, *b*. Сигналы получены от прозрачной полимерной пленки (скотч), наклеенной на зеркало, (см. рис. 2, *b*) и от тонкой пластины слюды, лежащей на зеркале. В обоих случаях имелись два слоя: пленка скотча и клеевой слой в первом случае, пластина слюды и воздушный зазор во втором. Соответственно имелись три отражающие границы.

Центральный интерференционный импульс (на рис. 2 и 3 крайний слева) с максимальной амплитудой осцилляций (нулевой импульс) соответствует нулевой разности хода волн в интерферометре. Боковые импульсы отражают сигналы корреляции объектного поля для разностей хода волн, определяемых уравнениями (5).

Показатель преломления полимерной пленки полагался  $n_{12} \approx 1,5$ , а клеевого слоя –  $n_{23} \approx 1,3$ . Геометрические толщины пленки и клеевого слоя, рассчитанные по интерференционному сигналу (см. рис. 2, *b*) с использованием соотношений (5), составили  $d_{12} \approx 55$  мкм и  $d_{23} \approx 15$  мкм соответственно. Для пластины слюды и воздушного зазора полагались  $n_{12} \approx 1,5$  и  $n_{23} \approx 1,0$ , а рассчитанные по экспериментальному сигналу (см. рис. 3, *b*) геометрические толщины слоев составили  $d_{12} \approx 60$  мкм и  $d_{23} \approx 180$  мкм соответственно. Погрешность измерения положения интерференционных импульсов, определяющих оптические толщины слоев, равна  $\pm 3$  мкм. С помощью контактного микрометра были проведены контрольные измерения толщин пленок скотча и слюды, которые составили в этом случае  $50 \pm 5$  мкм. Таким образом, различие в результатах измерений геометрических толщин двумя способами не превышало 15 %.

Приведенные сигналы хорошо иллюстрируют особенности интерпретации экспериментальных интерференционных сигналов в данной оптической схеме. В соответствии с изложенной выше теорией последовательность формирования импульсов в выходном сигнале интерферометра определяется оптической толщиной слоев, а не порядком их следования внутри структуры объекта.

Первым в шкале разности хода формируется интерференционный импульс взаимной когерентности волн, отраженных от границ слоя с наименьшей оптической толщиной. Для сигнала на рис. 2, *b* это тонкий клеевой слой между пленкой и поверхностью зеркала ( $\Delta_1 = 2d_{23}n_{23}$ ); для сигнала на рис. 3, *b* это пластина слюды ( $\Delta_1 = 2d_{12}n_{12}$ ). Второй интерференционный импульс формируется средним по оптической толщине слоем – полимерной пленкой для сигнала на рис. 2, *b* ( $\Delta_2 = 2d_{12}n_{12}$ ), воздушным зазором между пластиной слюды и поверхностью зеркала для сигнала на рис. 3, *b* ( $\Delta_2 = 2d_{23}n_{23}$ ). Третий импульс соответствует интерференции волн, отраженных от первой границы пластины или пленки и от последней границы – поверхности зеркала ( $\Delta_3 = 2d_{12}n_{12} + 2d_{23}n_{23}$ ).

Обратим внимание, что для приведенных сигналов на рис. 2, *b* и рис. 3, *b* одни и те же по порядку следования интерференционные импульсы соответствуют сигналам корреляции от разных по глубине расположения слоев исследуемых объектов. Установить однозначное соответствие между наблюдаемыми интерференционными импульсами и отражающими границами слоев возможно лишь благодаря априорной информации о геометрической



толщине и пространственном расположении одного из слоев в исследуемой структуре.

Сопоставление экспериментальных и теоретически полученных сигналов (см. рис. 2 и 3) показывает правильность используемого теоретического анализа. Различия в относительной амплитуде боковых импульсов теоретических и экспериментальных сигналов обусловлены двумя причинами. Первая причина состоит в том, что в теоретических расчетах использовалась приближенная модель слоистого объекта без учета процессов рассеяния и поглощения в каждом из слоев. Значения коэффициентов отражения и пропускания поверхностей задавались без учета соотношения показателей преломления граничащих слоев. Вторая причина обусловлена геометрией используемых слоистых объектов. В теоретической модели отражающие границы объекта считались плоскопараллельными друг другу. В реальных объектах, применяемых в наших экспериментах, отсутствовала эта параллельность границ слоев и имели место локальные неровности поверхности вблизи области зондирования. В интерферометре имелась возможность тонкой угловой подстройки одного зеркала, благодаря чему можно было увеличить амплитуду одного из побочных импульсов, однако при этом, как правило, уменьшалась амплитуда других импульсов. Поэтому по величине максимальной амплитуды боковых импульсов нельзя достаточно точно судить о коэффициентах отражения границ соответствующего слоя.

**Обсуждение экспериментальных результатов.** В обычной низкокогерентной интерферометрии с опорным пучком положения интерференционных импульсов временной когерентности в выходном сигнале в шкале разности хода соответствуют оптической глубине расположения (залегания) границ раздела сред в продольной структуре объекта.

В рассматриваемой интерференционной системе импульсы когерентности отражают взаимные положения этих границ, другими словами, оптические толщины различных слоев структуры объекта и их комбинации. Первый импульс формируется не ближайшим, а наиболее тонким слоем вне зависимости от его залегания. В нескольких иных представлениях можно утверждать, что сигнал такого интерферометра отражает пространственный спектр продольной структуры объекта, но не пространственное расположение границ раздела слоев.

Эти качества являются одновременно и достоинством, и недостатком данной интерференционной системы. При контролировании объекта с одним слоем, например при измерении толщины стекла, прозрачного покрытия или одиночного воздушного зазора, это качество системы следует отнести к очевидному достоинству. Положение интерференционного импульса когерентности в шкале разности хода волн в этом случае однозначно определяет искомым параметр объекта – оптическую толщину слоя. В ряде диагностических задач, в которых априорно известен порядок расположения отражающих границ в структуре контролируемого объекта, например в офтальмологии при контроле продольных (осевых) геометрических параметров прозрачных сред глаза [4, 6, 10], сигнал рассматриваемой автокорреляционной интерференционной системы позволяет количественно однозначно определить взаимные положения границ раздела сред в продольной структуре объекта.

Однако без априорной информации о структуре объекта по автокорреляционному сигналу интерферометра можно определить только оптические толщины слоев, но невозможно определить глубину их залегания. Кроме

того, если в структуре объекта окажутся два слоя или более с одинаковыми оптическими толщинами, то интерференционные импульсы от таких слоев совпадут и, следовательно, будут интерпретированы как один слой. Более того, интерференционные осцилляции этих импульсов в принципе могут оказаться в противофазе и подавить друг друга. Еще один недостаток рассматриваемой системы также связан с отсутствием опорной волны и заключается в сравнительно малой амплитуде интерференционных импульсов в отличие от обычной низкокогерентной системы, в которой увеличение амплитуды сигнала обеспечивается смещением объектной волны с достаточно интенсивной опорной волной.

Однако рассматриваемая автокорреляционная интерференционная система имеет ряд достоинств по сравнению с классическими системами. В первую очередь нужно перечислить следующие качества: в системе отсутствует ограничение на расстояние от интерферометра до контролируемого объекта и данная система может реализовывать дистанционный контроль удаленных объектов, что исключительно важно в ряде технических задач особенно при наличии агрессивных сред; расстояние до контролируемого объекта может изменяться в процессе измерений, следовательно, возможен контроль движущихся объектов и практически отсутствует влияние временной нестабильности объекта контроля, включая вибрацию, на результаты измерений; к интерферометру предъявляются более низкие эксплуатационные требования, поскольку объект контроля не включен в интерференционную систему; существенно меньше влияние дисперсии объектной среды на результаты измерений, особенно когда необходимо определить толщину слоя, находящегося достаточно глубоко в диспергирующей среде; интерферометр может быть выполнен на объемных оптических элементах, что определяет меньшие энергетические потери, а для зондирования объекта возможно использование оптического многомодового волокна и даже жгута волокон.

**Заключение.** В данной работе рассмотрен метод низкокогерентной автокорреляционной интерферометрии применительно к слоистым объектам с резкими (локализованными) отражающими границами его структуры. Дальнейшее развитие этого метода связано, на наш взгляд, с разработкой теории метода для объектов с непрерывно изменяющимися отражающими и рассеивающими оптическими параметрами, а также с разработкой математических алгоритмов обработки соответствующих автокорреляционных интерференционных сигналов для восстановления оптической структуры таких объектов. Решение этой задачи во многом предопределяет эффективность широкого использования этого метода, в том числе для решения задач биомедицинской диагностики.

Авторы выражают благодарность В. В. Тучину за организационную поддержку работы.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Иванов А. П., Чайковский А. П., Кумейша А. А.** Интерференционный метод исследования рассеивающих объектов // ДАН БССР. 1979. 23, № 6. С. 503.
2. **Власов Н. Г., Семенов Э. Г., Соколова М. Э.** Исследование рассеивающих сред и визуализация фазовых объектов в частично когерентном излучении // Голография и ее применение. Л.: ЛИЯФ. 1986. С. 184.

3. **Youngquist R. C., Carr S., Davies D. E. N.** Optical coherence-domain reflectometry: A new optical evaluation technique // Opt. Lett. 1987. **12**, N 3. P. 158.
4. **Fercher A. F., Mengedocht K., Werner W.** Eye-length measurement by interferometry with partially coherent light // Opt. Lett. 1988. **13**, N 3. P. 18.
5. **Hitzenberger C. K.** Measurement of corneal thickness by low-coherence interferometry // Appl. Opt. 1992. **31**, N 31. P. 6637.
6. **Fercher A. F., Hitzenberger C. K., Kamp G., El-Zaiat S. Y.** Measurement of intraocular distances by backscattering spectral interferometry // Opt. Commun. 1995. N 117. P. 43.
7. **Fercher A. F., Hitzenberger C. K., Drexler W.** Ocular partial coherent interferometry // Proc. SPIE. 1996. **2732**. P. 210.
8. **Morgner U., Drexler W., Kartner F. X. et al.** Spectroscopic optical coherence tomography // Opt. Lett. 2000. **25**, N 2. P. 111.
9. **Wojtkowski M., Leitgeb R., Kowalczyk A. et al.** In vivo human retinal imaging by Fourier domain optical coherence tomography // Journ. of Biomedical Opt. 2002. **7**, N 3. P. 457.
10. **Fercher A. F., Drexler W., Hitzenberger C. K., Lasser T.** Optical coherence tomography – principles and applications // Report Prog. Phys. 2003. **66**. P. 239.
11. **Геликонов В. М., Геликонов Г. В., Гладкова Н. Д. и др.** Когерентная оптическая томография микронеоднородностей биотканей // Письма в ЖЭТФ. 1995. **61**, вып. 2. С. 149.
12. **Иванов В. В., Маркелов В. А., Новиков М. А., Уставщиков С. С.** Дифференциальная низкокогерентная интерферометрия для in situ диагностики прозрачных микро-структур // Письма в ЖТФ. 2004. **30**, вып. 9. С. 82.
13. **Конonenко В. В., Конов В. И., Пименов С. М. и др.** Контроль лазерной обработки поликристаллических алмазных пластин методом низкокогерентной оптической интерферометрии // Квантовая электроника. 2005. **35**, № 7. С. 622.
14. **Мандель Л., Вольф Э.** Оптическая когерентность и квантовая оптика. М.: Наука, 2000.
15. **Гудмен Дж.** Статистическая оптика. М.: Мир, 1988.
16. **Скpоцкй Г. В.** Интерференция и когерентность // Матер. VI Всесоюз. шк. по голографии. Л.: ЛИЯФ, 1974. С. 37.

*Поступила в редакцию 17 августа 2006 г.*