

## ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ДИНАМИКИ СПЕКЛОВ ДЛЯ ПОЗИЦИОНИРОВАНИЯ ПЛОСКОЙ ПОВЕРХНОСТИ

**М.И. Дзюбенко, С.Н. Колпаков, В.П. Пелипенко, А.А. Приёмко**

*Институт радиофизики и электроники НАН Украины (Харьков)  
Украина*

Поступила в редакцию 21.05.2003

Взаимодействие когерентного излучения с шероховатой поверхностью приводит к образованию в пространстве спекл-поля. Приведена краткая история изучения спекл-эффекта. В спекл-поле содержится информация о пространственном положении той поверхности, от которой оно образовалось. В статье выведены зависимости, связывающие динамические параметры спеклов с параметрами позиционирования плоской поверхности. Рассмотрены варианты относительного положения поверхности и плоскости линзы. Описана схема эксперимента и представлены результаты измерения пространственного положения поверхности.

### ВВЕДЕНИЕ

*“На оптическом квантовом генераторе, работающем в непрерывном режиме, обнаружено неожиданное явление: если луч от генератора направить на неподвижную рассеивающую поверхность вроде белого матового экрана, то освещенный участок будет мерцающим”*, – так начиналась статья Оливье В.М. “Мерцающие пятна и статистическая дифракция”, опубликованная в 1963 году [1]. С появлением лазера стала реальной возможность изучения взаимодействия когерентного излучения с шероховатыми поверхностями. Оливье описывает свойства пятнышек, наблюдаемых без каких-либо оптических приборов, т.е. просто глазом. Позднее их называли спеклами.

Дальнейшие исследования показали [2 – 7, 9, 10], что спеклы несут в себе информацию о той поверхности, которая участвовала в их образовании. Одним из первых геометрические свойства спеклов исследовал М. Франсон [3]. Статистические свойства спеклов рассматривались во многих работах, например, [4 – 10]. Статистическая теория позволяет связать статистические свойства спеклов с аналогичными свойствами шероховатой поверхности. Но эта теория дает удовлетворительные результаты только в том случае, когда размер падающего пучка света соизмерим с размерами объекта. В случае, когда диаметр луча соизмерим со структурой шероховатостей, нарушается центральная предельная теорема, и статистическая теория не позволяет точно восстановить параметры поверхности.

Другой подход в изучении спекл-эффекта основан на его детерминированных свойствах. На основании теории стохастических и хаотических колебаний [11] можно утверждать, что все реальные шероховатые поверхности не являются абсолютно случайными в смысле теории

вероятностей. Их можно интерпретировать как динамические системы, описываемые большим, но конечным числом уравнений. Следовательно, поля, порождаемые этими объектами, тоже не абсолютно случайны, а содержат в себе информацию о той степени упорядочения, которая характеризует объект. Статическое спекл-поле (т.е. спекл-поле, полученное при неподвижных относительно друг друга объектах, лазере и приемнике) представляет собой динамическую систему, развивающуюся в пространстве. Детерминированное представление спекл-поля позволило использовать его в измерении конфигурации поверхностей сложной пространственной формы [12 – 14].

Хотя детальный анализ свойств спекл-эффекта начался с 60-х годов, исследования подобных явлений можно найти в значительно более ранней научной литературе по физике и технике. Следует особо отметить изучение “корон”, или фраунгоферовских колец в работах Верде и Релея [15, 16]. Позднее в серии статей, посвященных рассеиванию света большим количеством частиц, фон Лауэ установил многие основные закономерности явлений, аналогичных образованию спекл-структур [17].

Классическое представление спеклов, как случайных образований, предполагает использование точечного приемника. Линейчатые и матричные ПЗС-приемники позволяют намного шире использовать свойства спеклов в изучении шероховатых объектов. В этом случае спеклы рассматриваются как пространственный сигнал.

### ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ. ВЫВОД УРАВНЕНИЙ ИЗМЕРИТЕЛЬНОГО ПРЕОБРАЗОВАНИЯ

Качество решения ряда оптических задач зависит от точного позиционирования движущихся плос-

ких поверхностей и измерения их пространственного положения в каждый момент времени. Поверхности многих объектов являются шероховатыми. Поэтому взаимодействие с ними когерентного излучения сопровождается спекл-эффектом. В пространстве образуется спекл-поле. Сечение экраном этого поля приводит к образованию на нем спекл-картины (рис. 1, 2).

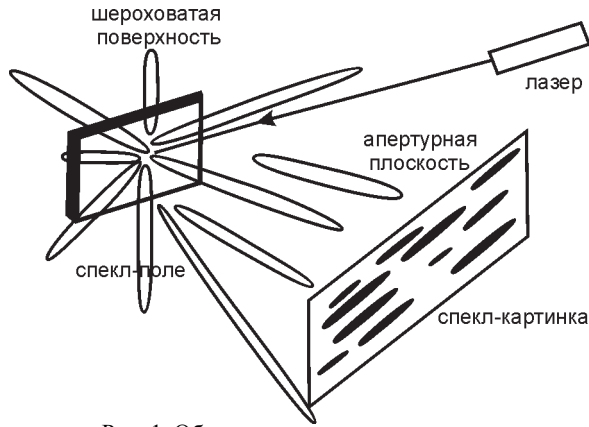


Рис. 1. Образование спекл-картины.

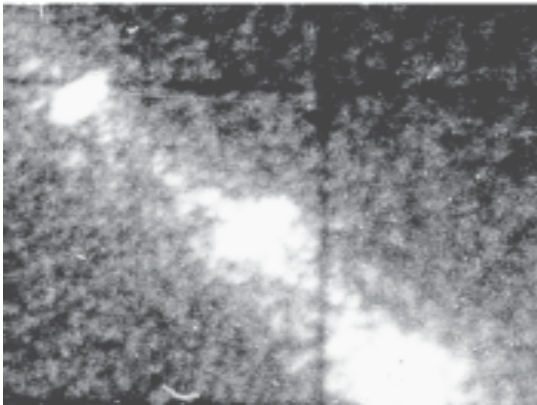


Рис. 2. Фотография спекл-картины

Как правило, диаметр луча намного меньше пространственных размеров объекта, с которым он взаимодействует. Поэтому поверхность взаимодействия луча с объектом практически является плоскостью. Это дает основание утверждать, что спекл-картина является следствием взаимодействия когерентного излучения с плоскостью. Движение этой плоскости в оптической схеме с линзой (рис. 3) не обязательно приводит к дви-

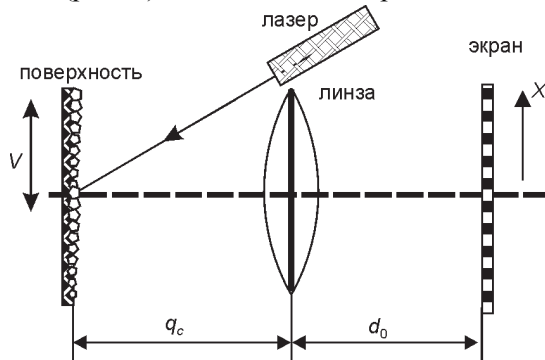


Рис. 3. К описанию динамических свойств спеклов.

жению спеклов на экране с той же скоростью и в том же направлении. Величина скорости и направление движения спеклов на экране зависят от состояния фокусировки отображающей системы. В статье рассматривается метод позиционирования плоской поверхности в пространстве путем измерения динамических параметров спеклов на экране.

Позиционирование характеризуется двумя параметрами: расстоянием от заданной плоскости, например, плоскости линзы до поверхности и углом между нормалью к поверхности и оптической осью линзы.

Определим взаимную корреляцию интенсивности спекл-картины  $I(x, t)$  в двух точках пространства и времени  $(x, t)$  и  $(x + \xi, t + \tau)$ . Если функция взаимной корреляции имеет резкий пик во всех точках  $\xi = V_0 \tau$  и очень мала в других точках, можно сказать, что спекл-картина без изменения движется со скоростью  $V_0$ . Для определения функции корреляции  $\langle I(x, t)I(x + \xi, t + \tau) \rangle$  выразим интенсивность через комплексную амплитуду в точке  $x$  в момент времени  $t$  в плоскости изображения:

$$I(x, t) = |V(x, t)|^2. \quad (1)$$

Поле  $V(x, t)$  имеет сложное, с круговой симметрией, гауссовское статистическое распределение, которое позволяет связать корреляцию интенсивности с корреляцией комплексной амплитуды [18]:

$$\langle I(x, t)I(x + \xi, t + \tau) \rangle = \left| \langle V^*(x, t)V(x + \xi, t + \tau) \rangle \right|^2. \quad (2)$$

Поле  $V(x, t)$  в плоскости изображения можно связать с полем  $V_0(x, t)$ , излучаемым шероховатой поверхностью в объектной плоскости:

$$V(x, t) = \int_{-\infty}^{\infty} h(x, u)V_0(u)du, \quad (3)$$

где  $h(x, u)$  – импульсный отклик изображающей системы.

Так как объектное поле движется со скоростью  $v$  в  $x$  – направлении, то можно записать:

$$\langle V^*(x, t)V(x + \xi, t + \tau) \rangle \cong \delta(\xi - v\tau). \quad (4)$$

Подставляя это выражение в (1) – (3), получаем:

$$\langle I(x, t)I(x + \xi, t + \tau) \rangle = \left| \int_{-\infty}^{\infty} h^*(x, u)h(x + \xi, u + v\tau)du \right|^2. \quad (5)$$

Для простой дефокусированной изображающей системы, показанной на рис. 3, пренебрегая влиянием конечности апертуры, имеем [19]:

$$h(x,u) = \exp \left[ i \frac{\pi}{\lambda} \left( \frac{x^2}{q_c} + \frac{u^2}{d_0} \right) - i \frac{\pi}{\lambda \epsilon} \left( \frac{x}{q_c} + \frac{u}{d_0} \right)^2 \right], \quad (6)$$

где  $\epsilon = 1/q_c - 1/D$ ;  $D$  – расстояние до плоскости, сопряженной с плоскостью экрана;  $\lambda$  – длина волны используемого излучения.

Подстановка выражения (6) в формулу (5) приводит к следующему:

$$\langle I(x,t)I(x+\xi,t+\tau) \rangle \cong \delta(\xi + v_c \tau), \quad (7)$$

где 
$$v_c = -\frac{D}{d_0} \left[ 1 + \left( 1 + \frac{d_0}{D} \right) \left( 1 - \frac{q_c}{D} \right) \right] v. \quad (8)$$

$$D = \frac{fd_0}{f - d_0}, \quad (9)$$

где  $f$  – фокусное расстояние линзы.

На рис. 4 и 5 показаны графики зависимости скорости спеклов на экране от скорости движения поверхности и расстояния от плоскости линзы до поверхности. Из них видно, что при некотором значении  $q_c$  скорость спеклов на экране всегда

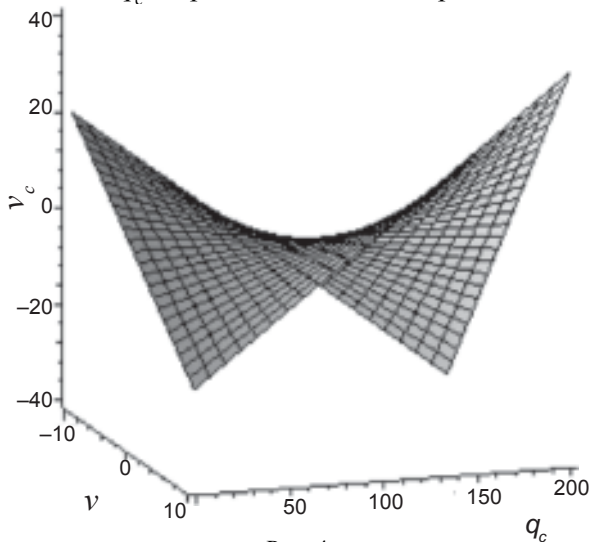


Рис. 4.

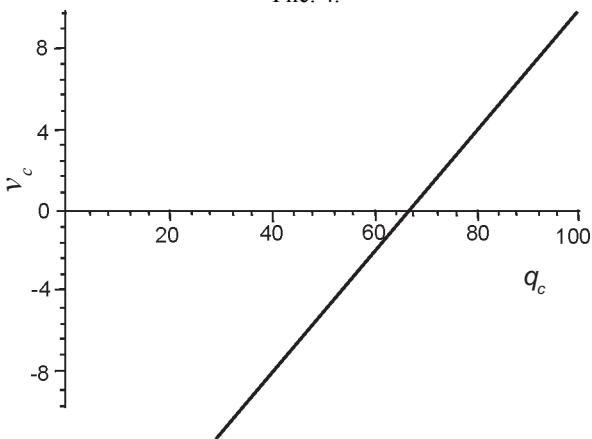


Рис. 5.

равна нулю независимо от скорости движения поверхности. Учитывая выражение (9), из фор-

мулы (8) находим расстояние от освещенной точки на объекте до плоскости линзы:

$$q_c = \frac{fd_0}{2f - d_0} \left[ \frac{v_c}{v} + \frac{3f - d_0}{f - d_0} \right]. \quad (10)$$

Скорость спеклов на экране равна нулю, когда расстояние от плоскости линзы до поверхности равно:

$$s = f \frac{2f + d_0}{f + d_0}. \quad (11)$$

В этой точке спеклы меняют направление движения на экране при неизменном направлении движения поверхности. При  $q_c = s$  спеклы неподвижны. Вместо движущейся картины спеклы имеют вид непрерывно меняющейся, но статистически стационарной картины. Кажется, что они “кипят” и не двигаются. Конечность апертуры изображающей системы, которой мы пренебрегли ранее, приводит к расширению функции взаимной корреляции из уравнения (7), при этом ее пик остается на месте [21].

Рассмотрим три случая, полностью описывающих положение позиционируемой плоскости и экрана. В первом случае поверхность параллельна плоскости экрана (рис. 6). Как видно из (8), в этом случае пространственное положение полностью определяется расстоянием  $q_c$  или скоростью спеклов  $v_c$  на экране.

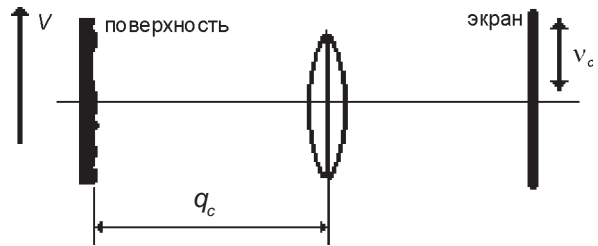


Рис. 6.

Во втором случае поверхность находится под углом к оптической оси изображающей системы (рис. 7). При движении поверхности расстояние  $q_c$  меняется во времени, т.е. меняется скорость спеклов на экране (согласно формуле (8)). Очевидно, что угол  $\alpha$  определяется скоростью изменения  $q_c$  во времени или, что тоже самое, ускорением спеклов  $a_c$ . Следовательно, положение плос-

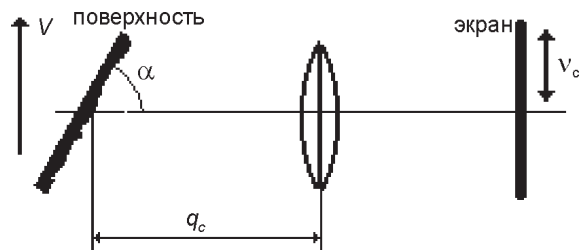


Рис. 7.

кости в пространстве полностью определяется этим параметром. Скорость спеклов на экране в этом случае определяется выражением:

$$v_c = -\frac{D}{d_0} \left[ 1 + \left( 1 + \frac{d_0}{D} \right) \left( 1 - \frac{q_c + vt/\operatorname{tg}\alpha}{D} \right) \right] v, \quad (12)$$

где  $t$  – время;  $\alpha$  – угол между плоскостью и оптической осью.

Дифференцируя выражение (12) по времени, находим ускорение спеклов (рис. 8):

$$a_c = \frac{v^2(1 + d_0/D)}{d_0 \operatorname{tg}\alpha}.$$

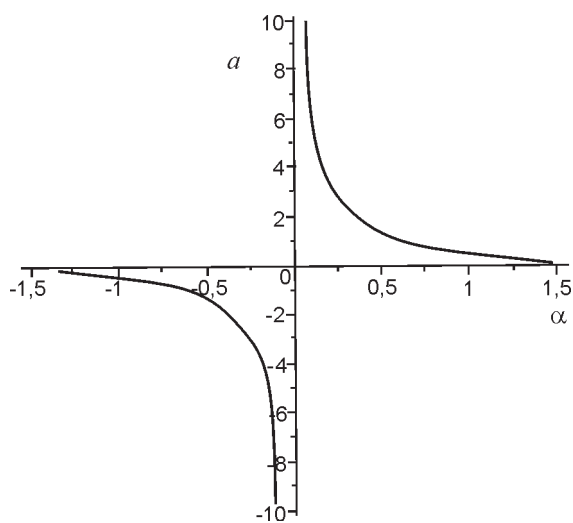


Рис. 8.

Из этого выражения находим второй параметр позиционирования – угол:

$$\alpha = \operatorname{arctg} \left( \frac{v^2(D + d_0)}{a_c d_0 D} \right). \quad (13)$$

Таким образом, измерения скорости и ускорения спеклов на экране позволяют вычислить расстояние от плоскости линзы до поверхности (10) и угол между поверхностью и оптической осью изображающей системы (13).

Третий, самый общий случай, показан на рис. 9. Здесь также происходит изменение расстояния  $q_c$  во времени, но это изменение не постоянно, оно тоже изменяется. Поэтому каждому

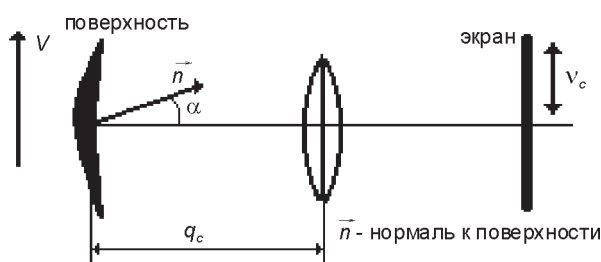


Рис. 9.

расстоянию  $q_c$  соответствует определенное значение угла  $\alpha$ . Изменение угла  $\alpha$  во времени описывает конфигурацию поверхности. Это изменение полностью определяется производной ускорения спеклов по времени.

Приведенный вывод скорости спеклов был основан на одномерной модели изображения. Он может быть легко распространен на двумерный случай. Если оси  $x$  и  $y$  совпадают с главными осями изображающей системы и если  $v_x$  и  $v_y$  являются составляющими скорости изображения шероховатой поверхности, то составляющие скорости спеклов определяются обобщением уравнения (8):

$$v_{cx} = -\frac{D_x}{d_0} \left[ 1 + \left( 1 + \frac{d_0}{D_x} \right) \left( 1 - \frac{q_c}{D_x} \right) \right] v_x,$$

$$v_{cy} = -\frac{D_y}{d_0} \left[ 1 + \left( 1 + \frac{d_0}{D_y} \right) \left( 1 - \frac{q_c}{D_y} \right) \right] v_y$$

где  $D_x$  и  $D_y$  – расстояния до плоскостей, сопряженных с плоскостью изображения для  $x$  и  $y$  составляющих соответственно.

Скорость и ускорение спеклов могут быть получены путем измерения смещения максимума корреляции между последовательными реализациями спекл-картины. В качестве фотоприемника для регистрации спекл-картины обычно используется матрица ПЗС. Спекл-картина может быть получена непосредственно на фотоприемнике или на экране.

### ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ МЕТОДА ПОЗИЦИОНИРОВАНИЯ

Экспериментальная проверка описанного выше метода позиционирования плоскости была проведена с целью разработки системы автофокусировки измерителя толщины полиэтиленовой пленки при ее производстве.

Схема эксперимента соответствует рис. 3. В качестве позиционируемой плоскости использовалось матовое стекло. He-Ne лазер типа ЛГ-208 формирует луч диаметром 1,3 мм и расходимостью 1,2 мрад. Длина волны лазерного излучения составляет 0,6328 мкм. Получаемое в результате взаимодействия луча с шероховатой поверхностью стекла спекл-поле образует на экране спекл-картину. В качестве экрана использовалась телевизионная установка типа ПТУ-50 без объектива. Спекл-картина формировалась непосредственно на ПЗС-матрице, изображение с которой наблюдалось на телевизионном мониторе. В эксперименте использова-



лась линза с фокусным расстоянием 250 мм. При плоско-параллельном смещении матового стекла происходило смещение спекл-картины. Экспериментальным изменением расстояния  $q_c$  от плоскости линзы до плоскости стекла добивались неподвижности спекл-картины на экране. Результаты экспериментов показаны на рис. 10. Непрерывная кривая соответствует теоретически рассчитанному по формуле (11) расстоянию, при котором спеклы на экране неподвижны. Другая кривая построена на основании экспериментального измерения этого расстояния. Отличия теоретических и экспериментальных результатов объясняются следующими причинами: неточнос-

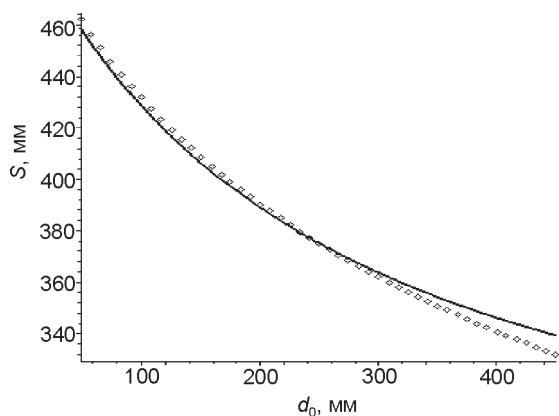


Рис. 10. Результаты эксперимента.

тью фиксирования момента неподвижности спеклов на экране монитора, неточностью измерения положения плоскости линзы, наличия у линзы aberrаций. Проведенные эксперименты с различными типами линз и поверхностей дали аналогичные результаты. Их анализ показал наличие систематической погрешности, связанной с измерением положения плоскости линзы и случайной погрешности, определяемой измерением скорости спеклов. Устранить случайную погрешность предполагается путем подключения матрицы ПЗС к ПЭВМ. В этом случае появляется возможность измерять не только скорость спеклов, но и их ускорение. Использование формул (10) и (13) позволит получить все параметры позиционирования плоской поверхности.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, теоретические и экспериментальные исследования динамических свойств спеклов позволили решить задачу определения пространственного положения движущейся плоской поверхности. Данный метод позиционирования был применен при производстве полиэтиленовой пленки. Кроме того, он может быть использован при лазерной гравировке и резке материалов, где необходимо точно “держат” фокус луча техно-

логического лазера на обрабатываемой поверхности. В этом случае параллельно с лучом технологического лазера устанавливается луч He-Ne лазера. Движение образца относительно луча приводит к движению спеклов на фотоприемнике. Оптическая изображающая система настроена таким образом, что при нахождении обрабатываемой поверхности в фокусе технологического лазера скорость спеклов равна нулю. При отклонении этой скорости от нуля подается сигнал на систему подфокусировки.

Спекл-метод может быть эффективен и в других задачах, где необходимо позиционирование динамических объектов.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Оливье В.М. Мерцающие пятна и статистическая дифракция//ГИИЭР. – 1963. – № 1. – С. 263 - 264.
2. Джоунс Р., Уайкс К. Голографическая и спекл-интерферометрия. - М.: Мир, 1986. – 328 с.
3. Франсон М. Оптика спеклов: Пер. с англ. - М.: Мир, 1980. – 228 с.
4. Гудмен Дж. Статистическая оптика: Пер. с англ. - М.: Мир, 1988. – 528 с.
5. Бакут П.А., Устинов Н.Д. Теория когерентных изображений. - М.: Радио и связь, 1987. – 317 с.
6. Мальцев Г.Н., Денисенко М.Ю. Автокорреляционная функция когерентного пятенного изображения//Оптика и спектроскопия. – 1998. – Т. 84, № 6. – С. 982 - 985.
7. Ангельский О.В. Корреляционная диагностика случайных пространственно неоднородных оптических полей //Квантовая электроника. - 1992. – Т.19, № 12. – С. 1151 - 1158.
8. Бакут П.А., Устинов Н.А., Троицкий И.Н., Свиридов К.И. Методы обработки световых полей при наблюдении объектов через турбулентную среду //Зарубежная радиоэлектроника. – 1976. – № 7. – С. 15 - 42.
9. Мельник И.С. Определение статистических характеристик изображения полированных металлических поверхностей//ОМП - 1992. – № 3. – С. 3-7.
10. Веселов Л.М., Попов И.А. Статистические свойства модулированной динамической спекл-картины// Оптика и спектроскопия. – 1998. – Т. 84, № 2. – С. 312 - 316.
11. Неймарк Ю.И., Ланда П.С. Стохастические и хаотические колебания. - М.: Наука, 1987. – 424 с.
12. Приёмко А.А. Пространственные параметры спекл-поля в восстановлении конфигурации// Технология приборостроения – 2001 – № 1-2 – С. 56 - 61.
13. Приёмко А.А. Контроль конфигурации глассады// Авиационно-космическая техника и технология. Сб. научн. Трудов ХГАКУ “ХАИ”. – 2001. – Вып.22. – С. 312-318.
14. Лахно В.И., Приёмко А.А. Спекл-метод измерения конфигурации промышленных изделий // Сб. научн. Трудов ХГТУРЭ. – 1999. – Ч.1. – С.105-108.
15. Verdet E. Ann. Scientif. L'Ecole Normale Superieure. – 1965. – Vol. 2. – P. 291 - 298.

16. Strutt I.W. (Lord Rayleigh) Phil. Mag. – 1880. – Vol. 10. – P. 73 - 77.
17. Von Laue M. Verhandl. Deut. Phys. Ges. – 1917. – Bd.19.– P.19-24.
18. Применение методов Фурье-оптики. Под ред. Г. Старка. - М.: “Радио и связь”, 1988. – 536 с.
19. Папулис А. Теория систем и преобразований в оптике. - М.: “Мир”, 1971. – 495 с.
20. Борн М., Вольф Э. Основы оптики. Пер. с англ. - М.: “Наука”, 1970. – 856 с.
21. Komatsu S., Yamaguchi I., Saito H. // J.Appl.Phys.– 1976.– № 15.– P. 1715 - 1724.

#### ВИКОРИСТАННЯ ДИНАМІКИ СПЕКЛІВ ДЛЯ ПОЗИЦІОНУВАННЯ ПЛОСКОЇ ПОВЕРХНІ

М.І. Дзюбенко, С.М. Колпаков,  
В.П. Пелипенко, О.О. Приймко

Взаємодія когерентного випромінювання із шорсткуватою поверхнею приводить до утворення в просторі спекл-поля. Приведено коротку історію вивчення спекл-ефекту. У спекл-полі міститься інформація про просторове положення тієї поверхні, від якої воно утворилося. У статті виведені залежності, які зв'язують динамічні параметри спеклів з параметрами позиціонування плоскої поверхні. Розглянуто варіанти відносного положення поверхні і площини лінзи. Описано схему експерименту та представлені результати виміру просторового положення поверхні.

#### USE OF SPECKLES DYNAMICS FOR PLANE SURFACE POSITIONING

M.I. Dzyubenko, S.M. Kolpakov,  
V.P. Pelypenko, O.O. Priyomko

The interaction of coherent radiation with a rough surface results in formation in space of a speckle-field. The brief history of study of speckle-effect is adduced. In a speckle-field the information on the space position of that surface is contained, from which it was derived. In the article the relations connecting dynamic parameters speckles with parameters of positioning of a flat surface are derived. The versions of relative position of a surface and plane of a lens are considered. The scheme of experiment is described and the outcomes of measurement of position of a surface are shown.



### Інформація

Готується до виходу

#### ДЕПАРТАМЕНТ ВИЩОЇ ОСВІТИ МІНІСТЕРСТВА ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ

Доводить до відома науковців, викладачів та студентів, що у видавництві “Політехніка” готується до виходу попереднє російськомовне видання навчального посібника “Парадоксы механики сплошных сред. Часть I. Вопросы нелинейной динамики сплошных сред”. (Автор – доцент Козачок А.А., під редакцією академіка НАНУ Бар’яхтара В.Г.).

За визнанням провідних фахівців наукових установ НАНУ та навчальних закладів, питання, які викладені у посібнику, є фундаментальними при вивченні механіки суцільного середовища, теорії пружності, математичної фізики, теорії коливань, будівельної механіки, опору матеріалів, динаміки машин.

Посібник можна замовити у видавництві “Політехніка” (03056, Київ-56, вул. Політехнічна, 14, корп. 15. тел.-факс 241-68-78).

Автори будуть вдячні за зауваження та пропозиції щодо поліпшення зазначеного видання, які будуть враховані в процесі його перекладу українською мовою.

Одночасно просимо взяти до уваги, що друга частина посібника “Новые подходы к постановкам и решениям некоторых классических задач математической физики” планується до видання у 2004 році.