

ВОЗМОЖНОСТИ ЛАЗЕРНОГО КОМПЬЮТЕРНОГО СПЕКЛ-ГОЛОГРАФИЧЕСКОГО ИНТЕРФЕРОМЕТРА ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ КОНЦЕНТРИРОВАННЫХ ПОТОКОВ ЭНЕРГИИ

А.В. Гончаров, Ю.Ф. Лонин, В.И. Кудрявцев, Н.С. Поддубко, А.Г. Толстолицкий
*Национальный научный центр «Харьковский физико-технический институт»,
Харьков, Украина*

E-mail: tolstolutskiy@kipt.kharkov.ua

Предложенное решение проблемы измерения малых энергий может быть проведено путем создания нового измерительного устройства на основе уникальных свойств спекл-голографии с современными разработками в области видео- и компьютерной техники. Разработанный лазерный компьютерный спекл-голографический интерферометр (ЛКСГИ) является прибором экспресс-анализа перемещений на уровне нанометров, а с ним и энергий на уровне миллиджоулей с пространственно-временным разрешением.

1. ВВЕДЕНИЕ

Существует много методов диагностики на основе интерферометрии и голографии [1]. Однако, они сложны как в процессе регистрации, так и в процессе обработки и получения полезной информации.

Лазерный компьютерный спекл-голографический интерферометр (ЛКСГИ) в отличие от наиболее прогрессивной голографической интерферометрии относится, прежде всего, к экспресс-методам контроля качества и является уникальным измерителем малых смещений и напряжений на уровне порядка нанометров в течение неограниченного времени при покадтовой регистрации. Система измерений позволяет решать ряд задач:

- о местах приложения и величинах нагрузок, действующих на упругое тело;
- о напряжениях в тонких пленках и связях их механических характеристик с напряжениями;
- о распределенных и локальных неоднородностях структуры тела при импульсном нагреве образца лазерным излучением, пучком заряженных частиц, СВЧ-энергией и т.п.;
- о микротрещинах и внутренних расслоениях, об отслоениях покрытий и деформационных предпосылках их возникновения и т.д.

Измерение концентрированных потоков энергии (КПЭ) малых величин, которые импульсно излучаются сверхширокополосными высоко-частотными генераторами, является актуальной задачей, так как нет эффективных приемников регистрации с пространственно-временным разрешением. Прибор ЛКСГИ пригоден для решения подобных задач. Описанию ЛКСГИ для исследования энергии СВЧ-излучения посвящено данное сообщение.

Развитие лазерной техники привело к созданию целого ряда методов диагностики материалов. Это интерферометрия, голография, голографическая интерферометрия для определения различных деформаций, смещений, изгибов, изменений формы поверхности под влиянием, например, внешнего импульсного источника нагрева и т.п. Существенным продвижением в вышеперечисленных измерениях стали методы спекл-голографии, которые по-

зволили исключить влияния внешних вибраций и смещений на качество регистрации. Однако методы регистрации оставались рутинными по причине фотографической обработки данных.

2. ГОЛОГРАФИЧЕСКАЯ ИНТЕРФЕРОМЕТРИЯ

Интерференция наблюдается при сложении двух волн, когда при условии их когерентности, т.е. постоянной разности фаз этих волн, возникает характерное пространственное распределение интенсивности света - интерференционная картина. С созданием лазера стала развиваться оптическая голография – способ записи и восстановления световых волн, рассеянных объектом и несущих информацию о его форме, т.е. трехмерного образа объекта.

С развитием голографии возникла голографическая интерферометрия, выполняемая гораздо проще, чем обычная интерферометрия, с меньшими затратами и ограничениями. Ее сущность такова: если совместить две голограммы объекта, записанные в различное время при разных состояниях поверхности объекта, то при освещении этой фотопластинки лазерным лучом возникает результирующая интерферограмма, отражающая разницу геометрических состояний объекта. Линии интерферограммы показывают как перемещения объекта в целом, так и локальную деформацию по его поверхности. Общие и локальные перемещения обычно хорошо разделяются.

Голография позволила исследовать объекты с любым рельефом. Голографический метод оказался удобным, надежным, быстрым и эффективным в работе. Один из главных недостатков методов голографической интерферометрии связан с необходимостью записи интерференционной структуры на высокоразрешающие фотоэмульсионные среды. Сам процесс записи и обработки голограмм довольно сложен и трудоемок: низкая чувствительность фотоматериалов требует экспозиций порядка секунд, мокрая обработка фотопластинок или обслуживание оборудования термопластической записи и визуальное считывание интерферограмм нуждается в специальных навыках операторов.

В качестве примера, на Рис.1 дана схема голографического интерферометра для определения распределения плотности энергии лазерного излучения высокой энергии в его поперечном сечении, которая была применена в экспериментах ННЦ ХФТИ [2]. Лазерный пучок высокой энергии (1) проходит через лавсановую пленку (2) и попадает на поглотитель (4). Перпендикулярно проходит рабочий пучок (3) диагностического лазера и попадает на фотопластинку (5). Опорный лазерный пучок (6) попадает на ту же фотопластинку (5) под некоторым углом к рабочему пучку (3).

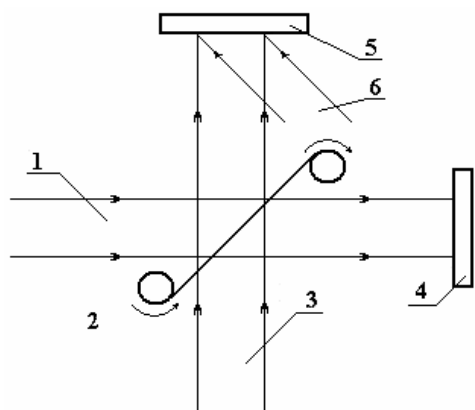


Рис.1. Схема голографического интерферометра для определения распределения плотности энергии пучка лазерного излучения в его поперечном сечении:

- 1 – лазерный пучок с высокой энергией в импульсе;
- 2 – лавсановая пленка с механизмом перемотки;
- 3 – рабочий пучок диагностического лазера;
- 4 – поглотитель лазерного излучения;
- 5 – фотопластинка – регистратор голограмм;
- 6 – опорный пучок диагностического лазера

Регистрация интерферограмм проводилась методом двух экспозиций. Первая экспозиция проводилась без включения лазера. На фотопластинку попадали лучи (рабочий и опорный, импульсного диагностического лазера с длительностью импульса 20 нс, и регистрировалась голограмма поверхности прозрачной лавсановой пленки. Для упрощения схемы измерений схема формирования рабочего и опорного лучей опущена. Вторая экспозиция проводилась с включенными лазером длительностью импульса 1 мс и диагностическим лазером одновременно. В этом случае на фотопластинке регистрировалась голограмма плазмы, которая образовывалась при сжигании лавсановой пленки лазером с высокой энергией излучения. Плазма является фазовым объектом, поэтому суперпозиция первой и второй экспозиций приводит к образованию интерференции на фотопластинке, которая отражает изменения фазы по полю наблюдения.

Результаты эксперимента показаны на Рис.2 в виде интерферограмм, полученных во время прохождения диагностируемого лазерного пучка через плазму в месте расположения пленки.

На этом рисунке видно, как формируется плазменное облако, которое образовалось из сгоревшей лавсановой пленки. Сначала интерференция образуется локально по полю наблюдения в виде отдельных темных точек (а). Затем плотность плазмы рас-

тет, и в отдельных местах наблюдается ряд интерференционных полос (б).



Рис.2. Интерферограммы, полученные по схеме измерений на Рис.1 при различных временах задержки времени запуска диагностического лазера относительно старта излучения лазера с высокой энергией: а – 0,3 мс; б – 0,4 мс; в – 0,6 мс

Далее плазма разогревается в местах большей концентрации энергии лазерного потока и видны островки уплотнений, которые локализируются в виде замкнутых кольцевых полос интерференции. По кольцевым интерференционным полосам можно определить среднюю плотность образующейся плазмы, которая составляет величину порядка 10^{18} см^{-3} .

3. СПЕКЛ-ГОЛОГРАФИЧЕСКАЯ ИНТЕРФЕРОМЕТРИЯ

При исследовании прозрачных фазовых объектов, как было показано в предыдущем разделе, спекл-структура не образуется, и проблем с регистрацией голографических интерферограмм не возникает. Голографическая регистрация объектов исследования с шероховатой поверхностью сопровождается спекл-структурой, которая возникает при взаимодействии когерентных лучей, отраженных от поверхности исследуемого объекта. На шероховатых лазерные лучи отражаются хаотически в пространстве над поверхностью и, встречаясь, взаимодействуют, создавая локальную точечную интерференционную картину у поверхности. При голографировании поверхности спекл-структура является шумом, ухудшающим изображение, но в спекл-интерферометрии это носитель информации, так как спекл-структура зависит от формы поверхности и хорошо отражает ее изменения. Для разделения спекл-структуры от голографического изображения достаточно провести регистрацию голограммы методом сфокусированного изображения объекта на регистраторе [3]. Запись и сопоставление двух спекл-структур выявляют изменения в положении или геометрии тела в виде такой же системы линий, как и в голографии, т.е. интерферограммы, причем, с той же чувствительностью.

Спекл-картины обычно формируются при отражении когерентного света от случайно рассеивающей среды. В результате интерференции световых лучей, пришедших от случайно распределенных рассеивателей, на экране создается случайная структура распределения интенсивности света в виде ярких и темных пятен – спекл-картина. Если в среде происходит изменение движения рассеивателей или изменение их физико-химического состояния, то эти изменения обязательно найдут отражение и на спекл-картине. Статистический анализ изменяющихся спекл-картин позволяет выявлять важные характеристики физико-химических процессов, протекающих в исследуемых объектах.

В качестве оптического динамического метода может быть выбран метод спекл-интерферометрии. Он позволяет наблюдать за изменением структуры поверхности в отраженном свете или структуры рассеивателей в объеме в прошедшем рассеянном свете.

Обычно спекл-структура имеет вид хаотически расположенных мелкоструктурных темных и светлых пятен размером порядка микрометра, которые видны при сильном увеличении (Рис.3).

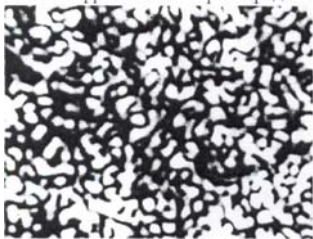


Рис.3. Спекл-картина в поле дифракции лазерного пучка на шероховатой поверхности

В спекл-структуре темных полей всегда больше, чем светлых. Поэтому увеличение размеров спеклов приводит к уменьшению полезной площади, дающей информацию об объекте. Это надо иметь в виду при измерениях.

При получении спекл-голограммы (спекл-фотографии) фиксируемая на ней спекл-структура обусловлена микроструктурой поверхности объекта и зависит от апертуры фокусирующей системы. Спекл-структура, фиксируемая на всех видах голограмм и присутствующая на восстановленных голографических изображениях, обусловлена микроструктурой поверхности объекта и однозначно с ней связана в том смысле, что смещению поверхности между двумя экспозициями соответствует смещение спекл-структуры на голограмме, спекл-голограмме и восстанавливаемом голографическом изображении. Этот вывод позволил рассмотреть существующие методы расшифровки голограмм двойной экспозиции с единых позиций спекл-интерферометрического подхода [4], согласно которому образование голографических интерферограмм, формирующих идентичные (соответствующие) спекл-пятна, обусловлено интерференцией излучения.

4. ЭЛЕКТРОННАЯ СПЕКЛ-ГОЛОГРАФИЧЕСКАЯ ИНТЕРФЕРОМЕТРИЯ

Современная видео- и вычислительная техника помогла решить некоторые задачи получения, хранения, считывания и обработки голографических интерферограмм, но она же представила и другую возможность. Как появление лазера изменило положение в экспериментальной оптике, так и компактная компьютерная техника вызвала второе большое изменение: фотографический детектор был заменен цифровой видеосистемой с регистрацией в ЭВМ оцифрованной видеоинформации о разных, практически неограниченных по количеству экспозициях процесса измерения перемещений и дальнейшей обработкой этой информации.

Этот компьютерный метод, называемый электронной спекл-интерферометрией, во многом сов-

падает с голографической интерферометрией: использование лазера, близкие оптические схемы и по существу те же результаты измерений в виде интерферограмм. Разница состоит в том, что голография фиксирует полную информацию о геометрии тела, в том числе и объем, а спекл-интерферометрия использует электронную фотографию особо тонкой, «зернистой» структуры света, отраженного диффузным объектом при лазерном освещении, – поле спеклов. Детектор – фотопластинка, видеокамера фиксирует спекл в виде зернистой структуры на изображении.

Запись и сопоставление двух спекл-структур, легко проводимые на ЭВМ в цифровой форме, выявляют изменения в положении или геометрии тела в виде такой же системы линий, как и в голографии, т.е. интерферограммы, причем с той же чувствительностью. Уменьшение информативности спекл-интерферограммы по сравнению с голографической за счет замены объемной картины на плоскую в рассматриваемом случае несущественно, а методически неоднородный процесс голографической интерферометрии заменяется единым, технологически связанным циклом с более широкими возможностями автоматизации.

Важной особенностью электронной спекл-интерферометрии является то, что можно записать практически неограниченное количество экспозиций и затем брать их произвольные комбинации. Каждое сочетание будет отражать сдвиг объекта между экспозициями. Можно сравнивать кадры не только статического состояния, но также кадры, сделанные во время движения объекта; необходимо только подобрать время экспозиции и время между экспозициями. Соответственно последовательность сочетаний экспозиций покажет движение объекта с субмикронной точностью.

Метод электронной спекл-интерферометрии позволяет применять цифровые камеры для регистрации декорреляции спекл-структур сравниваемых состояний зоны контакта и элементарно просто выполнять вычитание изображений и осуществлять образование корреляционных интерференционных полос непосредственно в компьютере, исключив тем самым стадию ввода интерференционных полос и упростив их обработку [5].

С использованием электронной спекл-интерферометрии была создана система нового поколения для измерения напряжений в упругих телах и конструкциях, в которой объединены идеи и методы голографической интерферометрии, разработанные ранее для анализа смещений, с преимуществами современной компьютерной техники. Кроме исследования напряжений эта система позволяет решать и другие задачи: о местах приложения и величинах нагрузок, действующих на упругое тело, о напряжениях в тонких пленках и связях их механических характеристик с напряжениями, о распределенных и локальных неоднородностях структуры тела, о микротрещинах и внутренних расслоениях, об отслоениях покрытий и деформационных предпосылках их возникновения и т.д. Измерения проводятся практически в режиме реального времени.

5. ОПИСАНИЕ ЛАЗЕРНОГО КОМПЬЮТЕРНОГО СПЕКЛ-ГОЛОГРАФИЧЕСКОГО ИНТЕРФЕРОМЕТРА

На основании проведенного поиска возможностей спекл-голографии и современной цифровой регистрации объектов вместе с развитием компьютерной техники можно создать диагностическую систему регистрации изменений в состоянии или положении исследуемых объектов нового поколения с уникальными возможностями.

Оптическая схема измерений в данном случае может быть выглядеть следующим образом (Рис.4). В ее состав входят блок спекл-голографического интерферометра и компьютер с блоком согласования работы с видеокамерой.

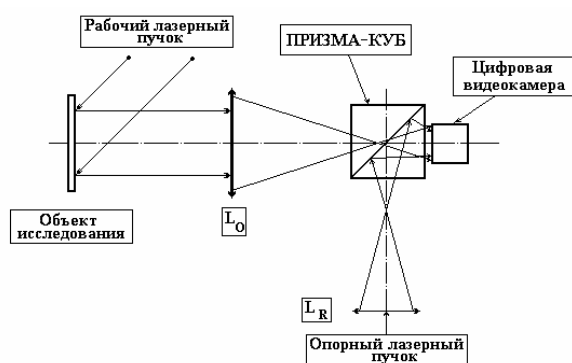


Рис.4. Оптическая схема ЛКСГИ без компьютерного блока

Блок интерферометра располагается на опорно-устойчивочной конструкции в жестком корпусе для устранения внешних вибраций и смещений в процессе работы. В корпусе монтируется диагностический лазер, цифровая видеокамера и элементы оптической схемы: линзы L_0 для формирования изображения объекта исследования в видеокамере и L_R для создания голограммы объекта на светочувствительном элементе видеокамеры, призма-куб для совмещения рабочего и опорного лучей лазера по одной оси с видеокамерой. В качестве диагностического лазера может служить полупроводниковый лазер с длиной волны 640 нм и мощностью излучения 10 мВт. Цифровая видеокамера должна иметь высокие показатели по чувствительности (0,1 люкс) и разрешения по полю регистрации (600 телевизионных линий на миллиметр).

Компьютерный блок состоит из ПЭВМ, имеющей видеовход для подключения цифровой видеокамеры. При отсутствии видеовхода в качестве аналого-цифрового преобразователя может быть использовано внешнее устройство типа Cap View, подсоединяемое к ЭВМ через USB-порт.

Объект исследования может быть различным. Для исследования КПЭ низких энергий целесообразно использовать приемник, который описан в работе [6].

Измерительная система работает по методу двух экспозиций. Сначала с помощью видеокамеры производится регистрация поверхности объекта исследования – приемника без воздействия на нее КПЭ, т.е. тепловой энергии. Вторая экспозиция осуществляется тогда, когда на приемник импульсно оказы-

вает влияние тепловое излучение КПЭ. Под воздействием тепла поверхность в месте падения пучка КПЭ нагревается и деформируется. Эту деформацию регистрирует описанная измерительная система в виде интерференционной картины, которая образовалась путем наложения на чувствительный слой видеокамеры двух голограмм – от первой и второй экспозиций. Если подобное наложение двух спекл-голограмм не предусмотрено в цифровой видеокамере, то это действие должно быть предусмотрено в блоке согласования работы с компьютером или отдельной программой для компьютера. Со временем тепловое пятно будет расширяться по поверхности приемника, и каждое положение пятна будет фиксироваться видеокамерой вместе с компьютерным устройством. Таким образом, можно зафиксировать воздействие КПЭ во времени с момента его возникновения до полного затухания, т.е. когда тепло выровняется по величине по всей поверхности приемника.

ВЫВОДЫ

Разработана компактная переносная малогабаритная измерительная система для широкого диапазона исследований, в том числе и для исследования КПЭ.

Создана система нового поколения, в которой объединены идеи и методы спекл-голографической интерферометрии с преимуществами современной компьютерной техники и которая проводит измерения практически в режиме реального времени.

Система измерений может записать неограниченное количество экспозиций, затем брать их произвольные комбинации, получая интерферограммы, и, таким образом, изучать перемещения (смещения) объекта исследования вплоть до нанометров. При этом автоматически решается проблема определения знака перемещения и существенно облегчается расчет полной картины разности фаз в плоскости объекта.

ЛИТЕРАТУРА

1. Чарльз Вест. *Голографическая интерферометрия* / Пер. с англ. М.: «Мир», 1982, с.504.
2. А. с. №1623453. Способ регистрации распределения плотности энергии в сечении наносекундных и субмикросекундных пучков частиц / С.В. Корчажкин, Л.О. Краснова, В.В. Оболоник, А.Г. Толстолуцкий. 1990.
3. И.С. Клименко. *Голография сфокусированных изображений и спекл-интерферометрия*. М.: «Наука», 1985, с.224.
4. А.В. Осинцев, В.П. Щепинов. Совместное применение методов голографической интерферометрии и спекл-фотографии для измерения контактных давлений // *Заводская лаборатория*. 2001, т.67, в.6, с.42-44.
5. Р. Джоунс, К. Уайкс. *Голографическая и спекл-интерферометрия*. М.: «Мир», 1986, с.327.
6. А.В. Гончаров, Ю.Ф. Лонин, Н.С. Поддубко, А.Г. Толстолуцкий. Определение распределения плотности энергии в поперечном сечении концентрированного потока энергии // *ВАНТ. Серия «Плазменная электроника и новые методы ускорения»*. 2008, №4, с.14-17.

Статья поступила в редакцию 01.06.2010 г.

**THE POSSIBILITIES LAZER AND COMPUTER SPEKLE-HOLOGRAFIC
OF THE INTERFEROMETER FOR STUDY CONCENTRATED FLOW TO ENERGY**

A.V. Goncharov, Yu.F. Lonin, V.I. Kudryavcev, N.S. Poddubko, A.G. Tolstolutskiy

Proposed solution to the problem of measuring small energies can be carried out by creating a new measuring device based on the unique properties of speckle holography with modern developments in the field of video and computer equipment. The developed laser speckle computer holographic interferometer (LKSGI) is a rapid analysis instrument movements at the nanometer scale, and with it the energy level mJ with the spatial and temporal resolution.

**МОЖЛИВОСТІ ЛАЗЕРНОГО КОМП'ЮТЕРНОГО СПЕКЛ-ГОЛОГРАФІЧНОГО
ІНТЕРФЕРОМЕТРА ДЛЯ ДОСЛІДЖЕННЯ КОНЦЕНТРОВАНИХ ПОТОКІВ ЕНЕРГІЇ**

О.В. Гончаров, Ю.Ф. Лонін, В.І. Кудрявцев, М.С. Піддубко, О.Г. Толстолуцький

Запропоноване вирішення проблеми вимірювання малих енергій може бути проведено шляхом створення нового вимірювального пристрою на основі унікальних властивостей спекл-голографії з сучасними розробками в області відео- і комп'ютерної техніки. Розроблений лазерний комп'ютерний спекл-голографічний інтерферометр (ЛКСГІ) є приладом експрес-аналізу переміщень на рівні нанометрів, а з ним і енергій на рівні міліджоулів з просторово-часовим розподіленням.