

А.В. Карпов, А.М. Вин, Б.С. Ринкевичюс

*Национальный исследовательский университет «Московский энергетический институт»,
Россия, 111250, Москва, Красноказарменная ул., 14, E-mail: omfi@mpei.ac.ru*

ОПТИЧЕСКИЙ МЕТОД ВИЗУАЛИЗАЦИИ И ИЗМЕРЕНИЯ СМЕЩЕНИЯ ТРЁХМЕРНЫХ ОБЪЕКТОВ

АННОТАЦИЯ

В статье рассматриваются новый метод лазерной диагностики оптически неоднородных сред, основанной на явлении рефракции структурированного лазерного излучения (СЛИ), цифровой регистрации рефракционной картины (рефрактограммы) и ее компьютерной обработке. Рассмотрен лазерный метод визуализации плоских и объёмных объектов, описана экспериментальная установка и проведение измерений, в том числе измерение смещения непрозрачного экрана (прямоугольной поверхности). Приведены результаты обработки измерения расстояния между круговыми пучками.

ЛАЗЕРНАЯ РЕФРАКТОГРАФИЯ, 2D-РЕФРАКТОГРАММА, 3D-РЕФРАКТОГРАММА.

ВВЕДЕНИЕ

Особый интерес на практике, в промышленности, в научных (лабораторных) исследованиях представляет определение формы поверхности, а также перемещения объекта бесконтактным способом. В данном методе решается обратная задача: по полученному изображению восстанавливается форма или перемещение поверхности.

На качественно новом научно–техническом уровне находятся оптические методы диагностики неоднородных сред, которые используются для получения информации об оптической среде или потоке жидкости в выбранном сечении (2D-диагностика) и в объеме (3D- диагностика).

Использование лазерных оптических методов для диагностики в прозрачных средах полей акустического давления, температуры, плотности, солёности, скорости течения в потоках обусловлены их значительными преимуществами перед другими методами. Лазерные методы практически не имеют инерционных погрешностей, что позволяет проводить диагностику быстропротекающих процессов. Лазерные методы позволяют исследовать поле показателя преломления, которое потом пересчитывается в искомое поле другой физической величины.

Принцип измерения основан на использовании структурированного лазерного излучения (СЛИ), получаемого с помощью оптических дифракционных элементов, зондирующего исследуемый экран и регистрации части пучка, прошедшего мимо экрана [1].

Лазерное излучение, пройдя через дифракционный оптический элемент (ДОЭ), даёт совокупность элементарных лазерных пучков, которая может состоять из набора вертикальных и горизонтальных прямых. Назовём плоскость, перпендикулярную выходящей из ДОЭ совокупности элементарных лазерных пучков, исходной плоскостью. Если поместить цифровую камеру под некоторым углом к исходной плоскости, то на изображении, получаемым камерой, расстояние между соседними элементами

дифракционной картины (например, вертикальными или горизонтальными прямыми) будет различным в зависимости от формы поверхности исследуемого объекта, и угла между прямой, перпендикулярной плоскости камеры, и исходной плоскостью. Зная этот угол, и проанализировав полученные изображения, можно восстановить форму поверхности исследуемого объекта. По фотографии вычисляются координаты точек пересечения вертикальных и горизонтальных линий. Эти данные в дальнейшем используются для визуализации поверхности изучаемого объекта. При этом для съёмки совокупности элементарных лазерных пучков, расположенных на поверхности предмета, требуются две камеры, расположенные под некоторым углом друг относительно друга (желательно, чтобы этот угол был равен 90°).

В данном методе применяется СЛИ, образующееся с помощью специальных оптических элементов непосредственно на выходе источника. В таком способе сохраняется высокая когерентность и малая расходимость пучков, поэтому для описания модели структурированного лазерного излучения можно использовать представления геометрической оптики. Эта модель может быть представлена группой лучей, образующих поверхности в виде дискретного набора плоскостей [2].

Классические оптические элементы позволяют получать СЛИ ограниченного вида: узкий пучок, плоскость, крест. Ситуация улучшилась с появлением компактных ДОЭ, изготавливаемых методами дифракционной оптики.

ЛАЗЕРНЫЙ МЕТОД ВИЗУАЛИЗАЦИИ ТРЁХМЕРНЫХ ОБЪЕКТОВ

При проведении съёмки с помощью простого фотоаппарата получается плоское изображение, при этом теряется объёмность. Для фотографирования объёмных предметов используется стереосъёмка. Стереосъёмка – это получение стереопары изображений фотографическим способом. Стереопара представляет собой сочетание двух изображений одного и того же объекта с различных точек зрения. Одно изображение предназначается для левого, а другое – для правого глаза. При рассматривании стереопары, например, в стереоскоп изображение объекта воспринимается с такой же локальной глубиной, что и сам объект.

Основой стереофотографии является изготовление двух подобных, но не идентичных фотоизображений, полученных с двух точек съёмки относительно объекта. Действительное расстояние между точками съёмки называется базовым расстоянием или базисом фотосъёмки; величина его определяется тем, как должен выглядеть объект на стереоизображении. В идеальном случае оси фотокамеры и объективов в этих двух положениях (точках) должны быть параллельны. Избыточная сходимости осей объективов приводит к заметному изменению масштаба вдоль горизонтали изображения; на парных снимках это изменение происходит в противоположных направлениях.

Одним из существующих методов визуализации трёхмерных объектов является измерение формы с использованием проецирования интерференционных полос [3]. Нелокализованная интерференционная картина, образующаяся при детектировании двух пучков света (например, картина, получаемая в интерферометре Майкельсона), может быть использована для формирования интерференционных полос на поверхности предмета. Полоса появляется каждый раз, когда поверхность предмета пересекает интерференционную полосу в световом пучке. Форма этих интерференционных полос зависит от формы поверхности и от направления наблюдения.

Для данной задачи СЛИ существенно проще, чем использование двухлучевого интерферометра, потому что ДОЭ позволяет получать СЛИ с более узкими полосами, чем двухлучевые интерферометры, что повышает точность измерений.

Принципиальная схема эксперимента представлена на рис. 1.

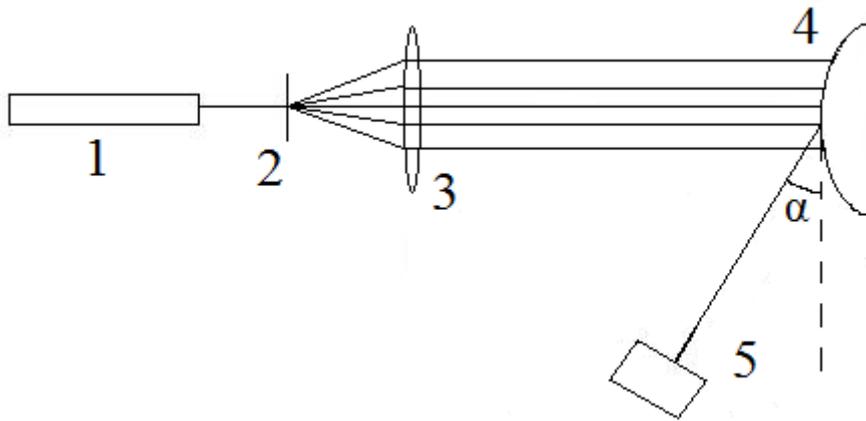
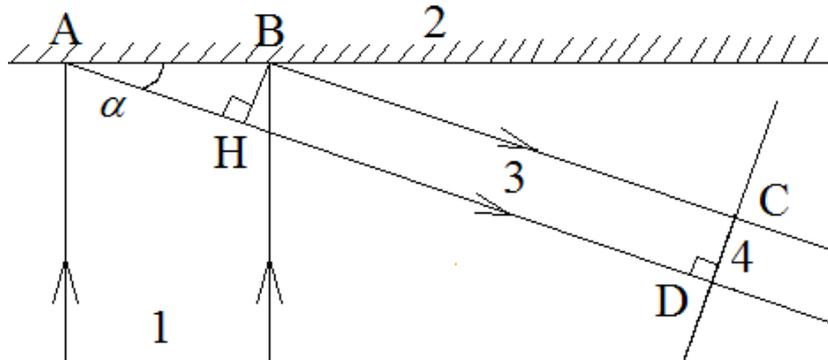


Рис. 1. Принципиальная схема эксперимента (вид сверху):
1 – лазер, 2 – ДОО, 3 – линза, 4 – исследуемая поверхность, 5 – цифровой фотоаппарат

Излучение полупроводникового лазера 1 с длиной волны излучения $\lambda = 548$ нм, мощностью 15 мВт распространяется вдоль оси оптической системы, проходит через ДОО 2, которое может формировать различные дифракционные картины, фокусируется линзой 3 на исследуемую поверхность 4, рассеянное излучение регистрируются с помощью цифровой видеокамеры 5.

Вначале были получены цифровые фотографии (рис. 4) дифракционных картин, формирующихся после прохождения лазерного излучения через ДОО, при их наблюдении перпендикулярно поверхности исследуемого объекта.

ВИЗУАЛИЗАЦИЯ ЭЛЕМЕНТА ПЛОСКОСТИ



1 – падающий пучок, 2 – поверхность, 3 – отраженный пучок, 4 – плоскость камеры, CD – плоскость изображения, получаемого камерой.

Рис. 2. Расчёт расстояния между вертикальными прямыми на изображении плоскости, которое получено камерой сбоку

$$CD = BH ,$$

$$\sin \alpha = \frac{BH}{AB} .$$

Таким образом, расстояние на изображении, получаемом камерой, от центральной вертикальной прямой до n -ной равно:

$$CD = AB \sin \alpha .$$

ОПИСАНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ УСТАНОВКИ И РЕЗУЛЬТАТЫ ИЗМЕРЕНИЙ

Излучение лазера 1 проходит через объектив 2 и попадает на экран 4. Изображение интерференционной картины на экране фотографируется с помощью цифрового фотоаппарата 3.

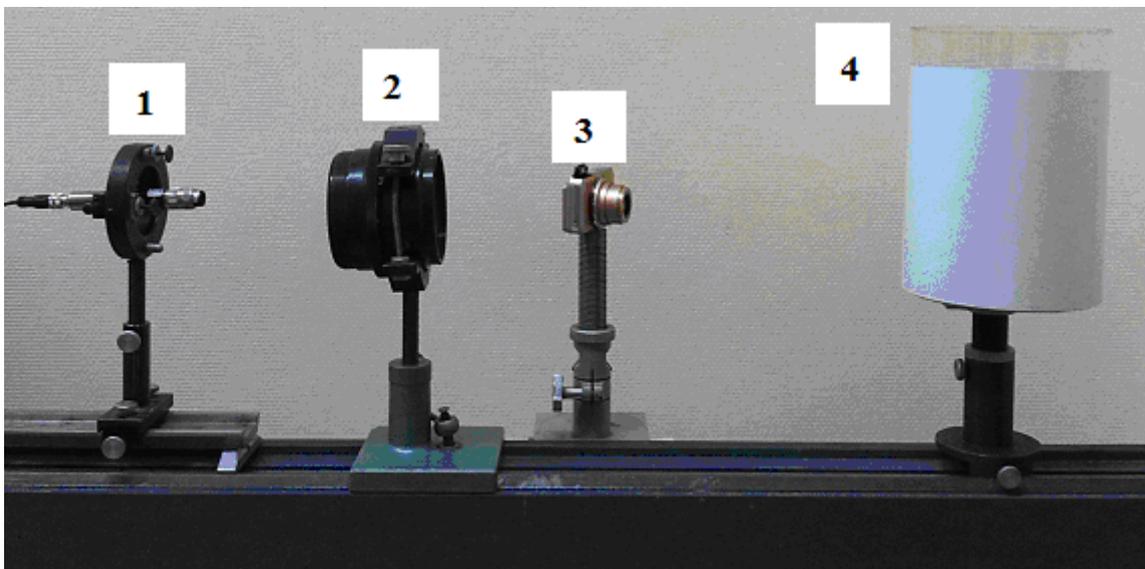


Рис. 3. Принципиальная схема оптического комплекса: 1 – лазерный модуль, 2 – объектив, 3 – цифровой фотоаппарат, 4 – экран

Ниже представлены изображения СЛИ на полупрозрачном плоском экране, установленном перпендикулярно направлению распространения.

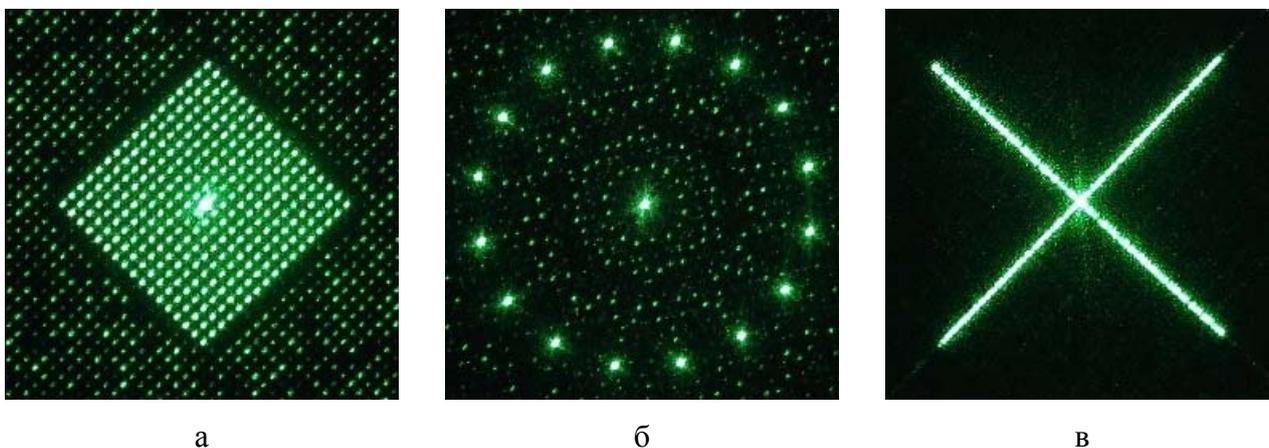


Рис. 4. Изображения СЛИ на экране: а – прямоугольная точечная сетка, б – круговая точечная сетка, в – крестовидный пучок

Изображения СЛИ на диффузном плоском экране, установленном под углом к направлению распространения:

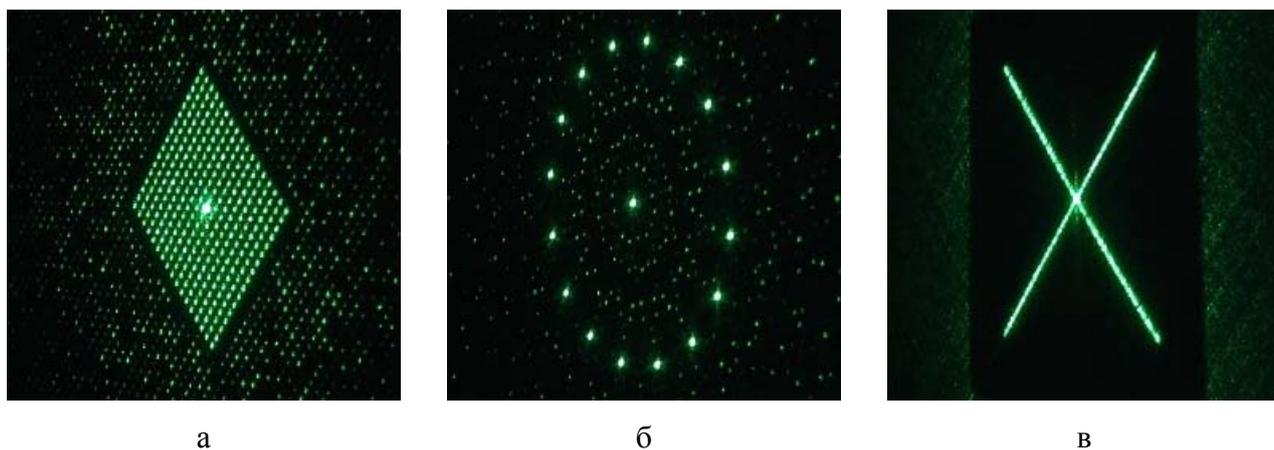


Рис. 5. Изображения СЛИ на наклонном экране: а – прямоугольная точечная сетка, б – круговая точечная сетка, в – крестовидный пучок

По полученным фотографиям можно найти угол поворота экрана. Измерим расстояние (в пикселях) между крайними горизонтальными точками на картине СЛИ (Фотографии были получены при одинаковых условиях эксперимента, а именно – одинаковое расстояние до плоскости падения СЛИ, и при одних и тех же параметрах фотокамеры). Из обработки рисунков 1 (а) и 1 (а) угол наклона равен 27° , при измерении с помощью угломера угол наклона составлял 25° .

ВИЗУАЛИЗАЦИЯ ОБЪЕМНЫХ ОБЪЕКТОВ

На рисунке приведены результаты визуализации трёхмерных объектов, полученные с помощью обычного фотографирования при освещении некогерентным излучением.

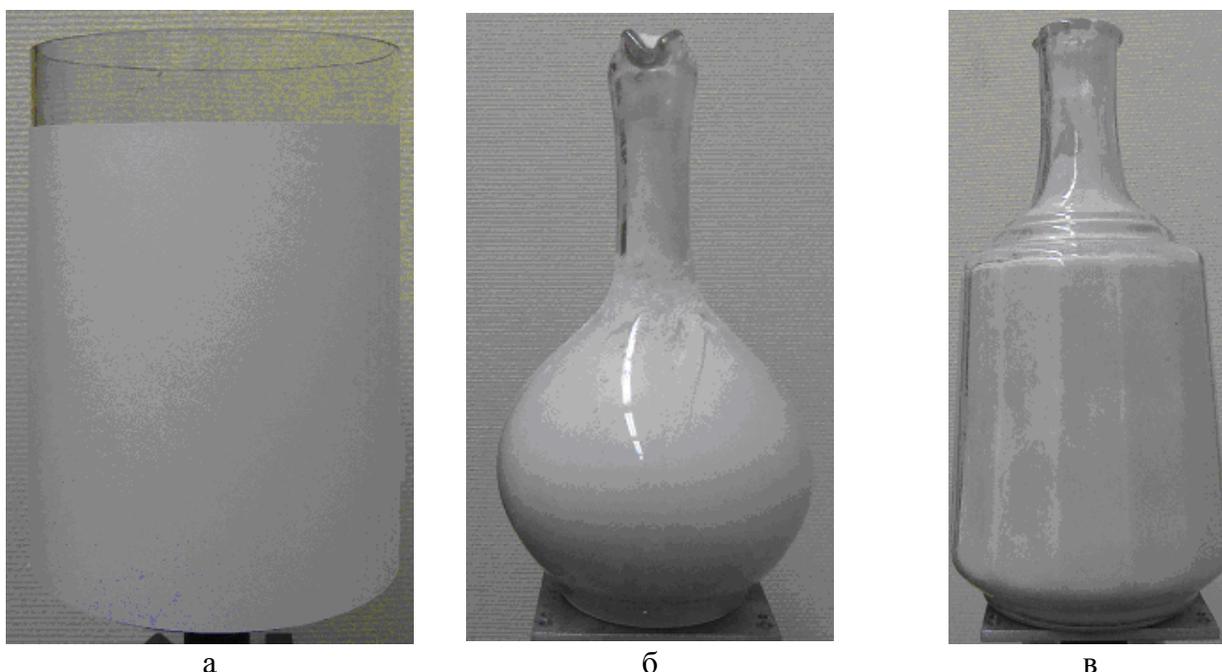
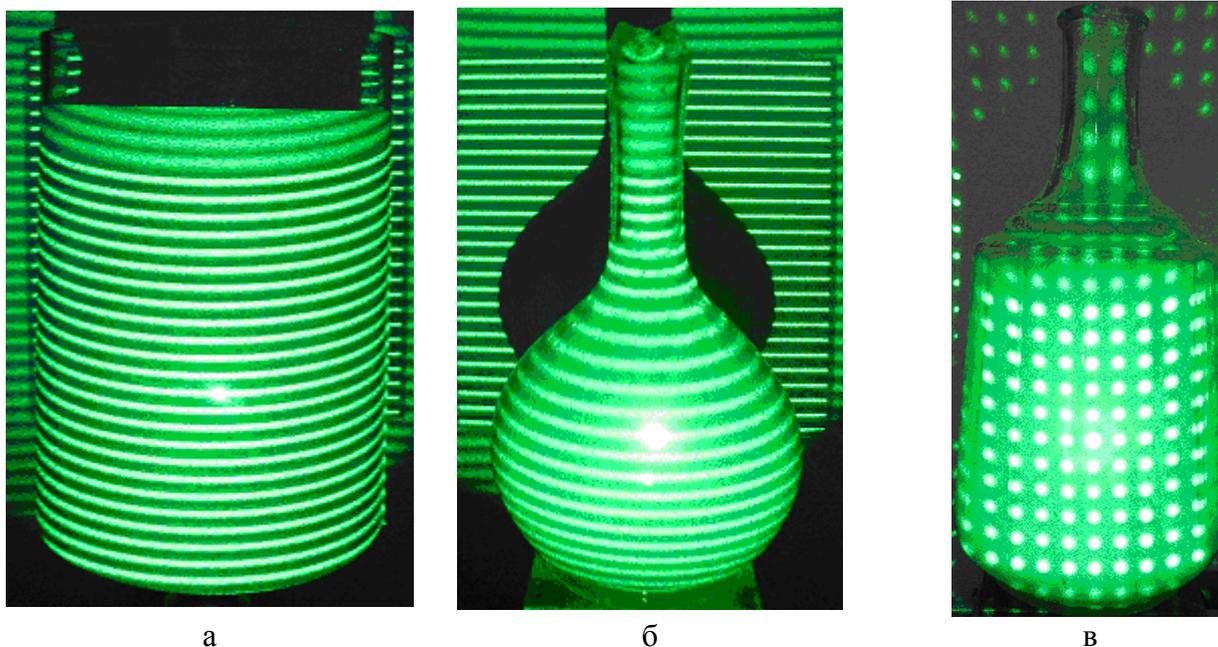


Рис. 6. Визуализация цилиндрических и сферических поверхностей: а – цилиндр, б – сферический кувшин, в – цилиндрический кувшин

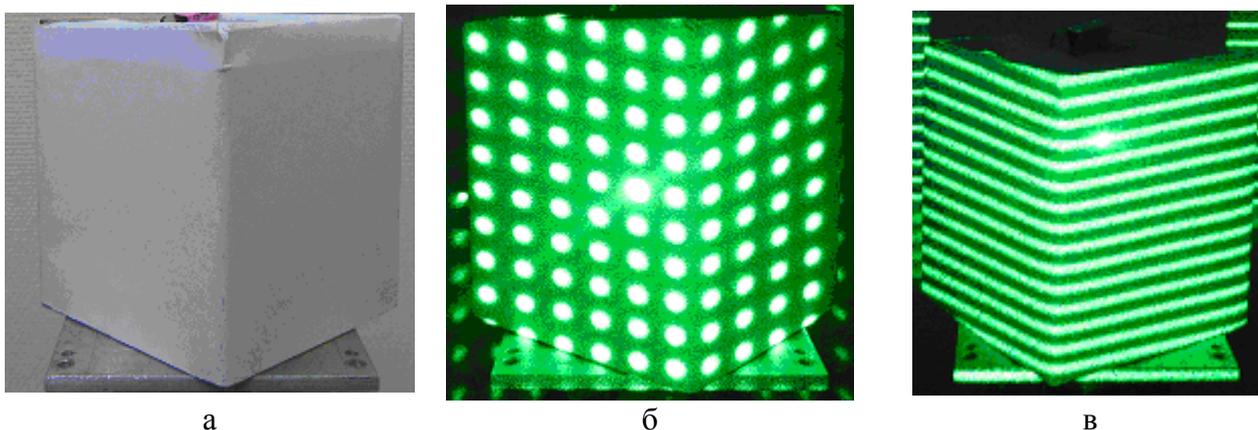


а

б

в

Рис. 7. Визуализация цилиндрических и сферических поверхностей: а – цилиндр, б – сферический кувшин, в – цилиндрический кувшин



а

б

в

Рис. 8. Визуализация объемных объектов с плоскими поверхностями: а – освещение некогерентным излучением, б – освещение точечным лазерным излучением, в – освещение линейчатым лазерным излучением

ИЗМЕРЕНИЕ СМЕЩЕНИЯ НЕПРОЗРАЧНОГО ЭКРАНА (ПРЯМОУГОЛЬНОЙ ПОВЕРХНОСТИ)

Для бесконтактного измерения смещения непрозрачного экрана была собрана экспериментальная установка, показанная на рис. 9. Излучение от лазерного модуля 1, состоящего из полупроводникового лазера и дифракционного элемента, проходит через объектив 2, направляется на непрозрачный экран 3, установленный на юстировочном столике 4, визуализируется на экране 5 и регистрируется с помощью цифрового фотоаппарата 6.

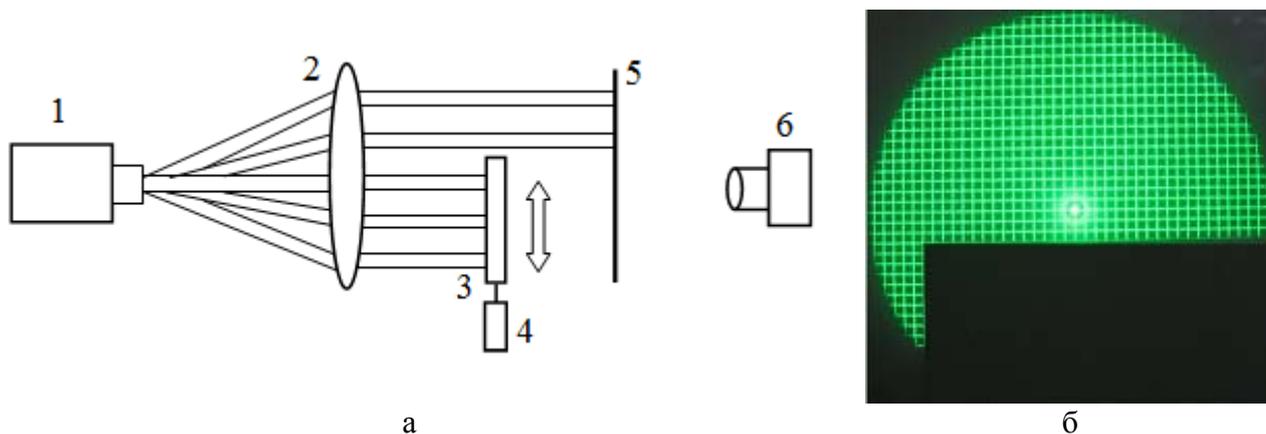


Рис. 9. (а) Принципиальная схема оптического комплекса: 1– лазерный модуль, 2 – объектив, 3 – непрозрачный экран, 4 – юстировочный столик, 5 – экран, 6 – цифровой фотоаппарат; (б) – Пример регистрируемой картины

В установке используется полупроводниковый лазер с мощностью 5 мВт. Длина волны излучения равна 0,51 мкм. Дифракционная система 2 содержит 6 различных дифракционных оптических элементов. Объектив 3 имеет фокусное расстояние 400 мм. Юстировочный столик позволяет перемещать в перпендикулярном направлении пластину 4 на расстояние 50 мм с шагом 0,1 мм.

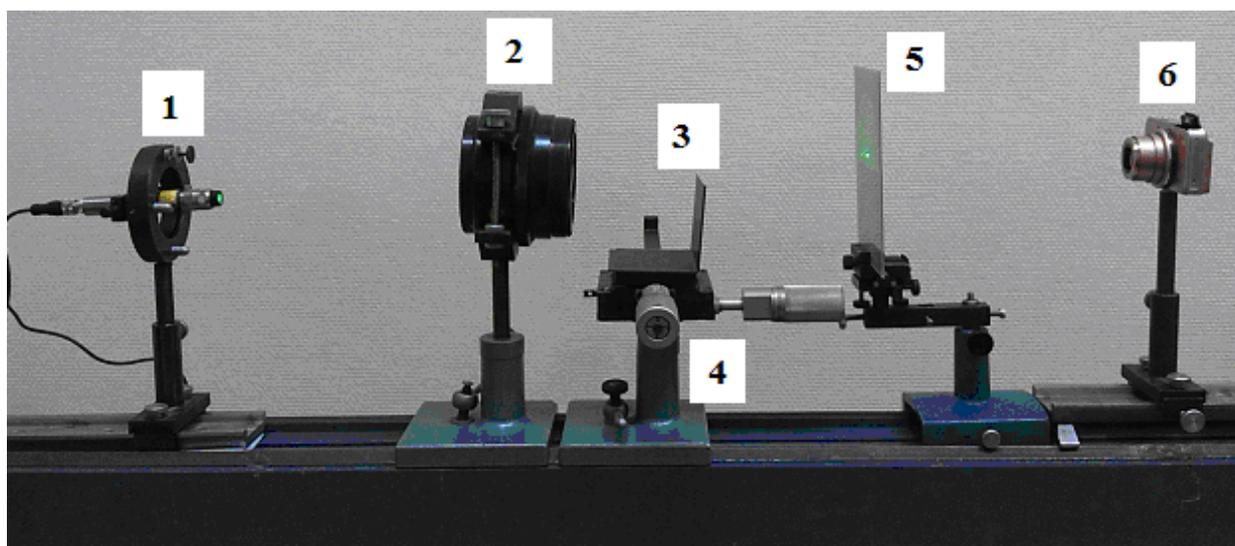


Рис. 10. Принципиальная схема лазерной установки: 1– лазерный модуль, 2 – объектив, 3 – непрозрачный экран, 4 – юстировочный столик, 5 – экран, 6 – фотоаппарат

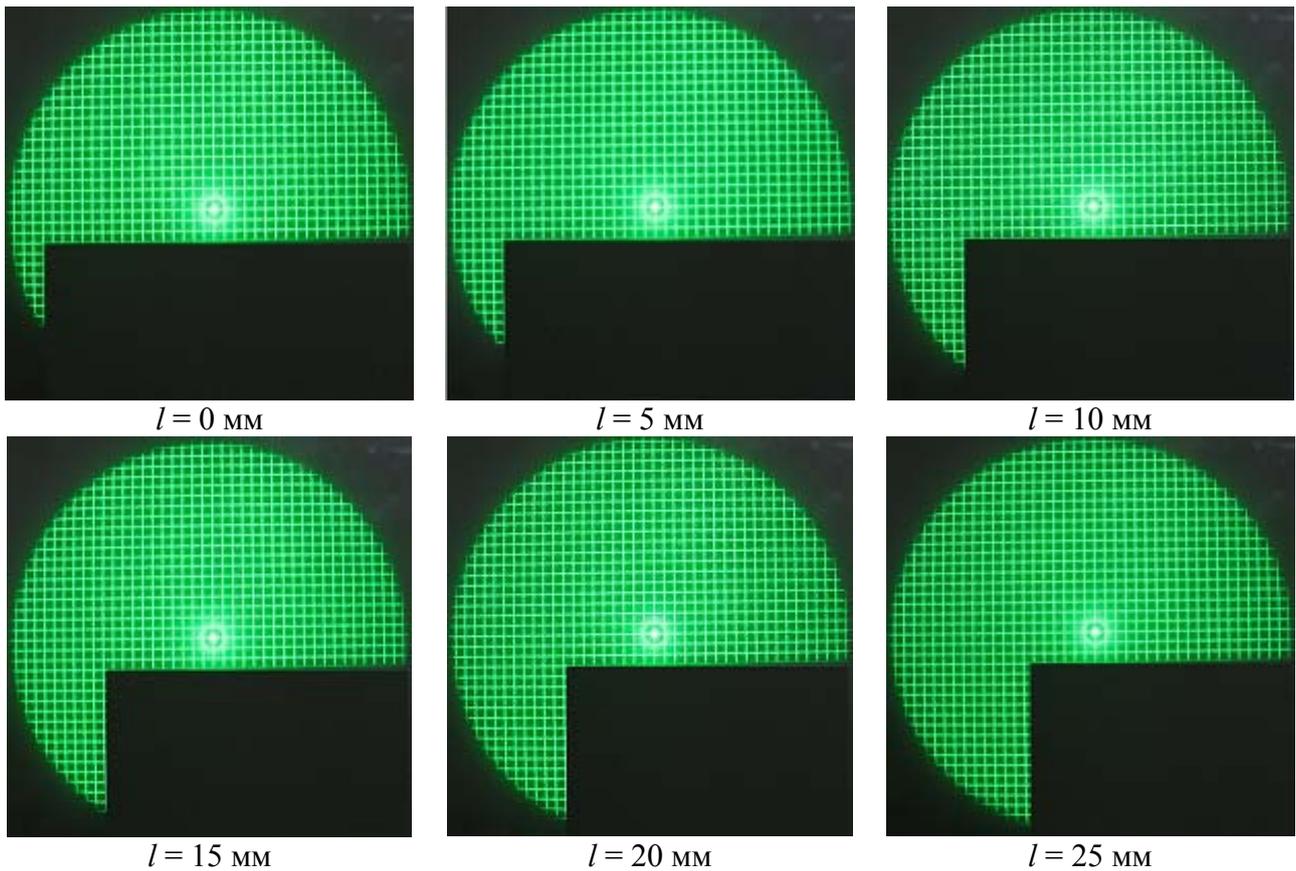


Рис. 11. Дифракционные картины для различных линейных экранов

РЕЗУЛЬТАТЫ ОБРАБОТКИ ИЗМЕРЕНИЯ РАССТОЯНИЯ МЕЖДУ КРУГОВЫМИ ПУЧКАМИ

Среднее значение: $S_{\text{сред}} = \frac{\sum_{i=1}^n S_i}{n}$, где S_i – расстояния между максимумами; $S_{\text{сред}}$ – среднее значение расстояния между круговыми пучками.

Расчет погрешности измерения расстояния между круговыми пучками: t – коэффициент Стьюдента, n – число замеров, ΔS – случайная погрешность.

$$\Delta S = t \cdot \sqrt{\frac{n}{\sum_{i=1}^n (S_{\text{сред}} - S_i)^2} \cdot \frac{1}{n(n-1)}};$$

$$S = S_{\text{сред}} \pm \Delta S.$$

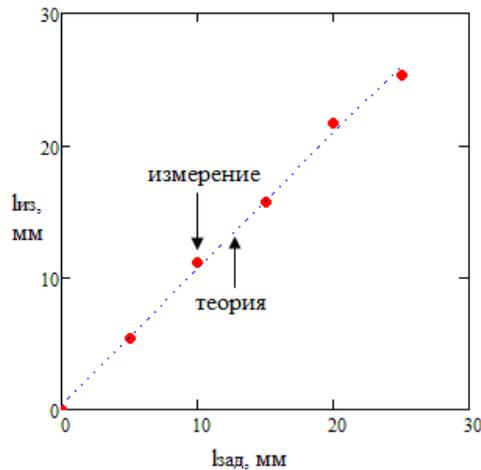


Рис. 12. Сравнение результатов измерений расстояния между круговыми пучками

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Лазерная рефрактография базируется на структурированном лазерном излучении. Комплексное использование этих составляющих ЛР обуславливает качественно новые возможности исследования различных оптически неоднородных прозрачных сред.

Разработана экспериментальная установка, содержащая полупроводниковый лазер с мощностью излучения 5 мВт, 6 дифракционных элементов для получения пучков различной формы, цифровую фотокамеру. Освоена методика проведения экспериментальных исследований. Разработана методика моделирования определения ошибки измерения параметров интерференционных картин. Проведены эксперименты по измерению прямоугольной поверхности как при помощи интерферирующих пучков, так и при помощи структурированного лазерного излучения, получаемого с помощью дифракционных оптических элементов. Получено удовлетворительное совпадение расчетных значений угла поворота плоской поверхности с задаваемыми при помощи поворотного столика.

Сделан краткий обзор методов визуализации трёхмерных объектов: стереофотография, интерференционный метод. Проанализирован способ визуализации трёхмерных объектов с помощью СЛИ. Проведён эксперимент, схема которого представлена на рис. 3. В результате эксперимента получены изображения дифракционных картин на поверхности различных объектов (плоскости, при различных углах наблюдения, и поверхности сложного объекта).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Евтихиева О.А., Расковская И.Л., Ринкевичюс Б.С. Лазерная рефрактография. М: Физматлит, 2008. – 176 с.
2. Сойфер В.А., Безус Е.А., Быков Д.А., Досколович Л.Л., Ковалев А.А. и др. Дифракционная оптика и нанофотоника. Физматлит. 2014. 608 с.
3. Джоунс Р., Уайкс К. Голографическая и спекл-интерферометрия. Пер. с англ. – М.: Мир, 1986. – 328 с.
4. Блейкер А. Применение фотографии в науке. М.: Мир, 1980. – 248 с.

A.V. Karpov, A.M. Win, B.S. Rinkevichyus

*National Research University “Moscow Power Engineering Institute”, Russia,
111250, Moscow, Krasnokazarmennaya st., 14, E-mail: omfi@mpei.ac.ru*

OPTICAL METHOD OF VISUALIZATION AND MEASUREMENT OF DISPLACEMENT OF THREE-DIMENSIONAL OBJECTS

In the article laser refractography (LR) is considered – it is a new method of laser diagnostics of optically inhomogeneous media, based on phenomenon of refraction of structured laser radiation (SLR), digital registration of refraction image (refractogram) and its computer processing. Laser method of visualization of flat and voluminous objects is considered, experimental installation and conduction of measurements is described, including measurement of displacement of opaque screen (rectangular surface). Results of processing of distance measurement between circular beams are presented.

LASER REFRACTOGRAPHY, 2D-REFRACTOGRAM, 3D-REFRACTOGRAM.