

УДК 535.8

С.И. Иншаков<sup>1</sup>, А.Ю. Родионов<sup>2</sup>, А.С. Ширин<sup>2</sup>, В.Н. Шехтман<sup>2</sup>

<sup>1</sup> ФГУП «ЦАГИ им. проф. Н. Е. Жуковского», 140181, г. Жуковский, Моск. обл.  
ул. Жуковского, д.1, E-mail: [tsagi@mail.ru](mailto:tsagi@mail.ru)

<sup>2</sup> ООО «Инженерно-физическая лаборатория», 195197, С-Петербург, ул. Жукова 18,  
E-mail: [shekhtman@mail.rcom.ru](mailto:shekhtman@mail.rcom.ru);

## **ИНТЕРФЕРОМЕТР ДЛЯ ОДНОВРЕМЕННОЙ РЕГИСТРАЦИИ ДВУХ ИНТЕРФЕРОГРАММ С ОРТОГОНАЛЬНЫМ НАПРАВЛЕНИЕМ СДВИГА**

*Представлена реализованная разработка интерферометра сдвига для исследования нестационарных или невоспроизводимых объектов. С помощью представленного интерферометра выполнены измерения оптической неоднородности газодинамических окон мощного лазера со сверхзвуковым потоком активной среды. Интерферометр представляет собой мобильный единый модуль, дополняемый плоским автоколлимационным зеркалом. Мобильность и виброустойчивость представленного интерферометра позволяет выполнять исследования в стендовых условиях. Программа обработки двух интерферограмм с ортогональным направлением сдвига изображений исследуемого объекта тестировалась с помощью виртуальных модельных объектов по специально разработанной методике, а также на стационарной модели при дублировании измерений интерферометром с референтным световым пучком.*

**ИНТЕРФЕРОМЕТР, ИНТЕРФЕРОГРАММА, СДВИГ ИЗОБРАЖЕНИЯ, ПОТОК,  
ГАЗОДИНАМИЧЕСКАЯ СРЕДА, СКАЧОК УПЛОТНЕНИЯ, ЛАЗЕР,  
ПРОСТРАНСТВЕННАЯ ЧАСТОТА**

### **ВВЕДЕНИЕ**

Применение интерферометров бокового сдвига для визуализации и количественного исследования распределения термодинамических параметров в газовых потоках основано, как на специфике, содержащейся в сдвиговых интерферограммах информации, так и на доступности стендовой реализации систем, включающих такие интерферометры. Важнейшее достоинство последних – виброустойчивость, которая особенно важна в случае выполнения исследований на газодинамических установках с присущим им широким спектром и высокой интенсивностью вибрации. Интерференционные картины от референтного волнового фронта в условиях вибрации часто регистрируют за счет сокращения времени экспозиции применением импульсных лазеров и отчасти новейших ПЗС камер, а в прошлом скоростных фоторегистраторов (СФР). В этом случае от кадра к кадру сложно было гарантировать сохранение параметров настройки интерференционной картины, что иногда было важно, например, для учета погрешностей, вносимых интерферометрической системой или анализа нестационарного потока.

При исследовании газодинамических сред с помощью интерферометров сдвига имеет место ряд отличий в информативности сдвиговых интерференционных картин от интерферограмм, полученных с референтным волновым фронтом.

Одним из таких отличий является возможность установить соотношение плотности до и после скачка уплотнения. С помощью настройки величины сдвига можно регулировать

величину смещения интерференционной полосы, соответствующую данному градиенту плотности в потоке. На интерферограмме, полученной с референтным фронтом, на скачке уплотнения имеет место разрыв интерференционной полосы, и соотношение плотности можно приблизительно определить по наклону фронта ударной волны. При этом предполагается, что до скачка уплотнения известны, по крайней мере, два термодинамических параметра среды. В сдвиговом интерферометре подбором величины сдвига можно обеспечить отсутствие разрыва полос на скачке, что позволяет установить соответствие интерференционных полос до и после скачка уплотнения. На рис. 1 приведены интерферограммы сдвига потока активной среды CO<sub>2</sub>-лазера. Размеры потока: вдоль оптической оси зондирующего светового пучка – 1850 мм; в вертикальном направлении в плоскости рисунка – 90 мм.

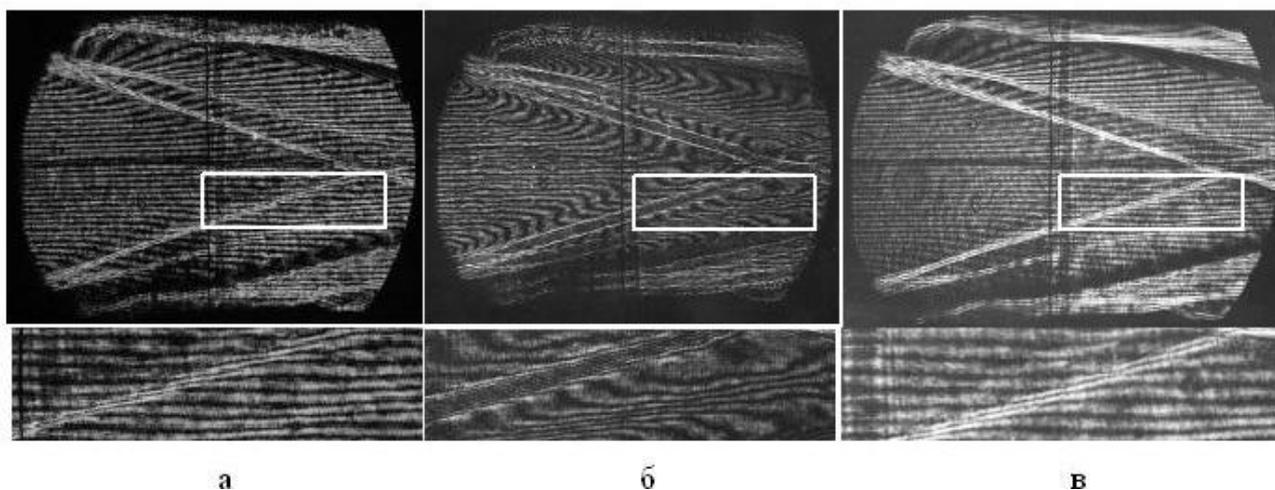


Рис.1. Интерферограммы сдвига потока активной среды CO<sub>2</sub>-лазера

Величина сдвига на интерферограммах на рис. 1а и 1в обеспечивает идентификацию полос до и после скачка уплотнения (под каждой из интерферограмм показано увеличенное изображение выделенного прямоугольником участка). Увеличение сдвига, интерферограмма на рис. 1б, приводит к более высокой чувствительности измерительной системы, но при этом становится проблематичной идентификация полос по обе стороны скачка уплотнения. Интерферограмма (рис. 1а) получена от рубинового лазера, а на рис. 1в от He-Ne лазера. Практически одинаковое разрешение полос на этих интерферограммах иллюстрирует виброустойчивость интерферометрической системы.

Другое отличие сдвигового метода от интерферометрии с референтным фронтом заключается в его избирательной чувствительности к различным пространственным частотам [1] и [2]. Если представить изменение показателя преломления газодинамической среды в виде пространственного спектра, то на сдвиговой интерферограмме при кратности величины сдвига и пространственной частоты амплитуда сигнала равна нулю, т.е. пространственные частоты, для которых выполняется:

$$S = nU_i, \quad (1)$$

где  $U_i$  – пространственная частота;  $S$  – сдвиг изображения;  $n$  и  $i = 1, 2, \dots$ , не будут представлены на интерференционной картине.

С другой стороны пространственные частоты, для которых выполняется условие  $U_i = (n+0,5)S$  приведет в два раза большему отклонению интерференционной полосы по сравнению с интерферограммой того же объекта от референтного волнового фронта. Это свойство интерферометра сдвига удобно использовать, например, при исследовании смещения потоков различных реагентов за сопловыми решетками и прочие объекты с

доминирующими пространственными частотами. На рис.2 представлены интерферограммы потока активной среды в химических HF лазерах.

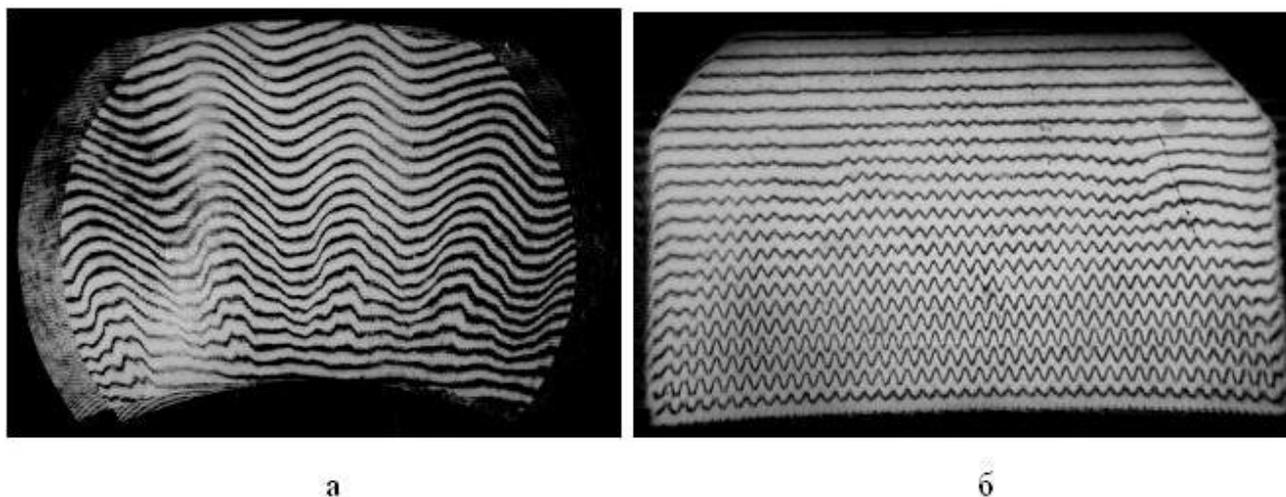


Рис. 2. Интерферограммы потока активной среды в химических HF лазерах

Интерферограмма на рис. 2а представляет собой смещение реагентов в расширяющемся потоке при расположении сопел на цилиндрической поверхности. На рис.2б аналогичная система с плоским сопловым блоком. Чередование сопел реагентов создает поток с соответствующим конструкции соплового блока доминирующим пространственным периодом, которому соответствует удвоенная по сравнению с интерферограммой от референтного фронта модуляция интерференционных полос.

Прочие неопределенности реконструкции фронта световой волны, свойственные сдвиговому методу исследования, и методы их устранения рассмотрены в [3] и [4].

Из принципа действия сдвиговых интерферометров следует, что отклонение интерференционной полосы на интерферограммах, полученных с использованием последних, отражает только составляющую деформации волнового фронта, совпадающую с направлением сдвига. Поэтому для получения двумерной картины неоднородности исследуемой среды требуется как минимум две интерферограммы с неколлинеарным направлением сдвига, чаще всего – ортогональным направлением последнего. С учетом пространственно спектральных свойств интерферометров бокового сдвига, в случае, когда необходимо исследовать масштабы неоднородности объекта меньшие величины сдвига для регистрации полного пространственного спектра исследуемого объекта необходимо фиксировать четыре интерферограммы, по две для каждого из упомянутых направлений, [3]. При этом отношение величин сдвига одинакового направления на двух интерферограммах, строго говоря, должно быть иррациональным числом, причем за единицу измерения следует принять масштаб, соответствующий максимальной пространственной частоте, подлежащей исследованию.

### **ИНТЕРФЕРОМЕТР ИФЛ-М10**

Для исследуемых объектов, нестационарность или невоспроизводимость которых не позволяет совместно обрабатывать две сдвиговые интерферограммы, регистрация которых выполнена с интервалом времени, необходимым для изменения настроек интерферометра, авторами разработан и изготовлен интерферометр со следующими свойствами:

- одновременно регистрируются две интерферограммы с ортогональным направлением сдвига;
- величина сдвига по каждому из направлений совпадает с точностью до несимметричных aberrаций интерферометрической системы;

– величина оптического клина, введенного в интерферометре для настройки полос – идентична.

Оптическая схема интерферометра приведена на рис. 3.

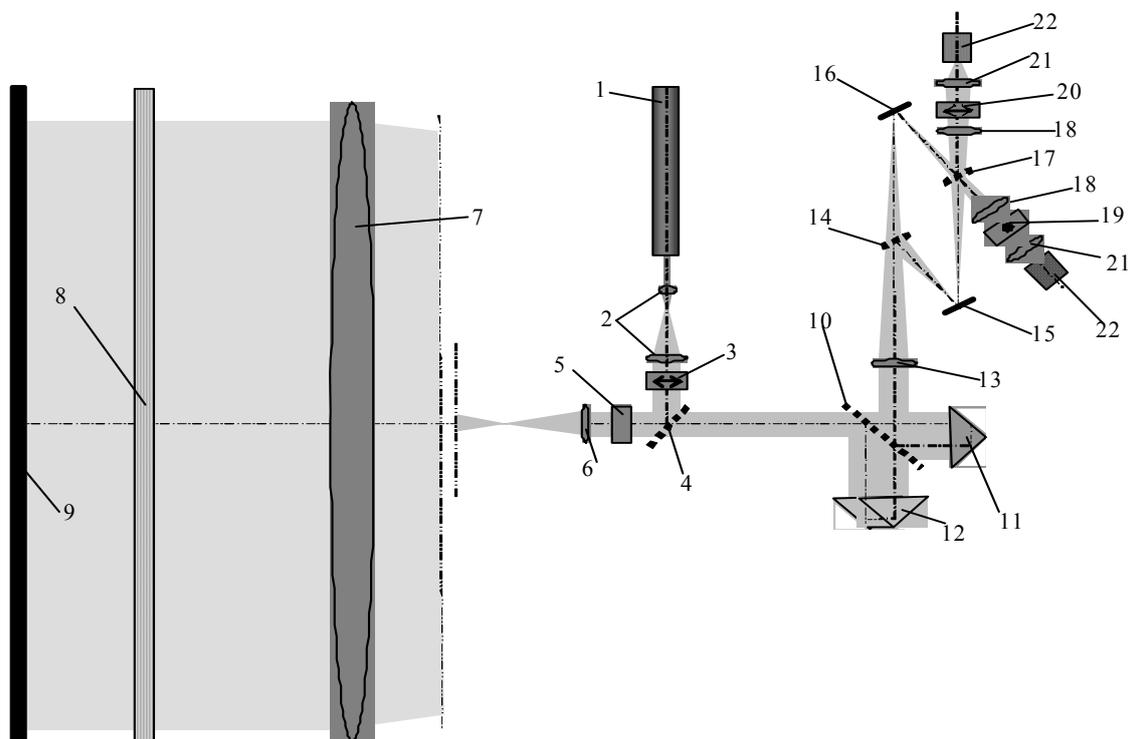


Рис. 3. Оптическая схема интерферометра:

1 – He-Ne лазер; 2 – телескопический расширитель пучка; 3 – поляризатор; 4 – светоделитель; 5 – четвертьволновая пластина; 6 и 7 – объективы телескопического расширителя; 8 – аэродинамическое окно; 9 – автоколлимационное зеркало; 10 – светоделитель; 11 – призма; 12 – призма поворота изображения; 13 – входной объектив телескопической системы интерферометра; 14 – светоделитель регулировки разности хода; 15 – зеркало настройки полос; 16 – зеркало регулировки сдвига изображений; 17 – светоделитель настройки полос; 18 – выходные объективы телескопической системы интерферометра; 19 – анализатор вертикальной поляризации; 20 – анализатор горизонтальной поляризации; 21 – объективы формирования изображения; 22 – ПЗС камеры

### Технические характеристики интерферометра

- |    |  |              |
|----|--|--------------|
| 1. | Световой диаметр зондирующего светового пучка не более, мм:                                    | 320          |
| 2. | Длина оптического пути (длина активной среды по оси зондирующего светового пучка) не более, м: | 10           |
| 3. | Диапазон измеряемых искажений волнового фронта, в длинах волн:                                 | от 0,2 до 20 |
| 4. | Длина волны зондирующего светового пучка, нм:  | 633 или 532  |
| 5. | Погрешность измерений в режиме интерферометра сдвига не выше:                                  | $\lambda/5$  |

Возможна реализация интерферометрических измерений с референтным фронтом световой волны.

В системе регистрации интерферограмм установлены две монохромные ПЗС камеры с объективами, обеспечивающими изображение плоскости предмета на расстоянии от 300 мм (и более) от зрачка интерферометра. Минимальное время экспозиции – 10 мкс, разрешение на изображении – 1280×960, количество кадров в секунду – 50. Позиции 18 и 21 (рис. 3) содержат по два объектива формирования изображения исследуемого объекта.

Конструктивно обеспечена возможность вводить и выводить эти объективы в световой пучок для реализации различного увеличения изображения.

На рис. 4 приведена фотография стенда при выполнении исследований оптической неоднородности аэродинамического окна.



Рис. 4. Фотография стенда при выполнении исследований оптической неоднородности аэродинамического окна

Аэродинамическое окно состоит из щелевого сопла и соответствующего диффузора, между которыми имеет место не ограниченный какими-либо поверхностями сверхзвуковой воздушный поток, отделяющий активную среду газодинамического лазера, статическое давление в которой варьировалось от 30 до 90 мм.рт.ст. от окружающего пространства. Размер аэродинамического окна в направлении потока – 10,0 мм, в перпендикулярном направлении – 150 мм.

На рис. 5 показаны интерферограммы сдвига при двойном проходе зондирующего светового пучка. Величина сдвига – 2,2 мм. На интерферограмме 5а сдвиг направлен вдоль меньшей стороны окна (на рисунке интерферограмма повернута на  $90^0$ ). Соответственно на интерферограмме 5б сдвиг направлен вдоль большей стороны.

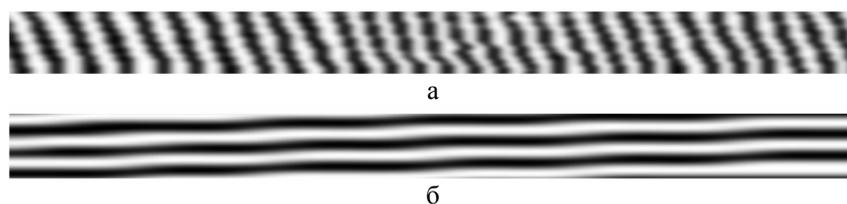


Рис. 5. интерферограммы сдвига при двойном проходе зондирующего светового пучка

Результат обработки пары интерферограмм сдвига (рис. 5) приведен на рис. 6. Деформация волнового фронта дана в мкм. Размах отклонения волнового фронта от плоской формы – 0,090 мкм.

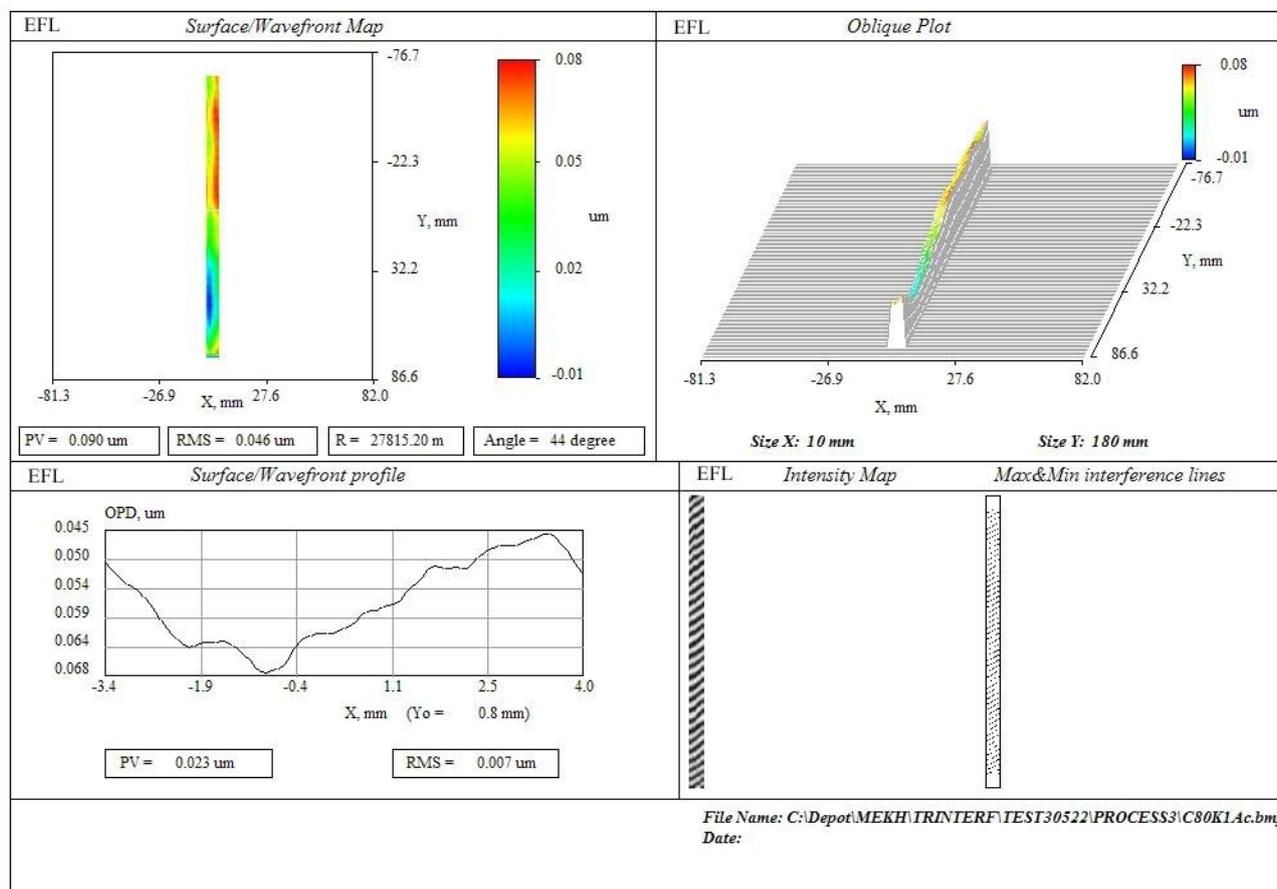


Рис. 6. Результат обработки пары интерферограмм сдвига

СКО – 0,046 мкм. Сечение эквифазовой поверхности с максимальной деформацией фронта расположено под  $44^{\circ}$  при отсчете от горизонтали против часовой стрелки. Кроме того, приведен радиус ближайшей сферы и график отклонения в указанном сечении.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Разработан и апробирован интерферометр для одновременной регистрации двух интерферограмм с взаимно ортогональным направлением сдвига.
2. Апробированы методики измерений и программное обеспечение обработки данных.
3. Виброустойчивость интерферометрического модуля позволяет проводить исследования газодинамических сред в условиях стендов с минимальной виброзащитой.

## БЛАГОДАРНОСТИ

Работа выполнена при поддержке Российского Фонда Фундаментальных Исследований (проект 100100785-а).

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Шехтман В.Н., Родионов А.Ю., Пельменев А.Г. Оптика и спектроскопия, т.76, №6, 1994, с. 986.
2. Шехтман В.Н., Родионов А.Ю., Пельменев А.Г. Оптика и спектроскопия, т.79, №1, 1995, с.134.

3. **Shekhtman V.N.** Proceeding of the NATO Advanced Research Workshop on Optical Resonators – Theory and Design, Smolenice Castle, Slovak Republic, July 1 – 5, 1997 (Kluwer Academic Publishers, Dordrecht / Boston / London)
4. **Шехтман В.Н.** ОМП, 1982, №10, с.1 – 4

S.I. Inshakov <sup>1</sup>, A.Ju. Rodionov <sup>2</sup>, A.S. Shirin <sup>2</sup>, V.N. Shekhtman <sup>2</sup>

<sup>1</sup> FGUP «TSAGI im. prof. N. E. Zhukovsky», 140181, Zhukovsky, Mosk. Reg., str. Zhukovsky, 1,  
E-mail: [tsagi@mail.ru](mailto:tsagi@mail.ru)

<sup>2</sup> ООО «Engineering -physical laboratory», 195197, S-Peterburg, str. Zhukov 18,

E-mail: [shekhtman@mail.rcom.ru](mailto:shekhtman@mail.rcom.ru)

### **INTERFEROMETER FOR SIMULTANEOUS REGISTRATION TWO INTERFEROGRAMS WITH RECTANGULAR SHIFT**

*It is known, that shift interferograms yield information about deformation of light wave front only in the direction of shift. But in the case of investigation nonstationary or irreproducible objects, for example, gas flows, by means of such device it is necessary simultaneous registration of two interferograms, desirable with ortogonal shift. The interferometer is representing utilize for simultaneous registration of two such interferograms. In this construction exact shift amount in two ortogonal directions are supplied. Diameter of parallel light beam is 320 mm. For source of light semiconductor laser with  $\lambda = 532$  nm is utilize. Interferograms are recorded by means of two monochromatic CCD cameras. Minimum exposure time is 10 mks, film speed 50 f/s. This device for explore of nonuniformity of aerodynamic window of powerful gas-dynamic laser is utilized. Program of such interferogram processing is tested on the stationary model and verify with data, obtained by means of interferometer with reference light beam.*

INTERFEROMETER, INTERFEROGRAM, IMAGE SHIFT, FLOW, GAS-DYNAMIC MEDIUM, SHOCK WAVE, LASER, SPATIAL FREQUENCY