

# РАСЧЕТ, ПРОЕКТИРОВАНИЕ И ПРОИЗВОДСТВО ОПТИЧЕСКИХ СИСТЕМ

УДК 681.787, 621.384.4

## ИНТЕРФЕРОМЕТРИЧЕСКИЙ КОНТРОЛЬ КРУПНОГАБАРИТНЫХ ОПТИЧЕСКИХ СИСТЕМ УЛЬТРАФИОЛЕТОВОГО ДИАПАЗОНА

© 2010 г. А. Б. Бельский\*, канд. техн. наук; М. А. Ган\*\*, доктор техн. наук; К. Г. Кушнарев\*;  
С. А. Ларионов\*\*

\* ОАО “Красногорский завод им. С.А. Зверева”, г. Красногорск, Московская обл.

\*\* НПК “Государственный оптический институт им. С.И. Вавилова”, Санкт-Петербург

E-mail: albor@zenit.istra.ru; gan@mail.wplus.net

Рассмотрены структура, основные модули и принцип работы разработанной автоматизированной интерферометрической системы контроля крупногабаритных УФ оптических систем, ее применение для сборки, юстировки и контроля крупногабаритных УФ объективов. Приведены предварительные исследования высококогерентного лазера ТА FHG-110 на основе двухкаскадного умножения частоты.

*Ключевые слова:* интерферометрическая система, волновой фронт, контролируемый объектив.

Коды OCIS: 120.3180, 120.3930, 220.4840

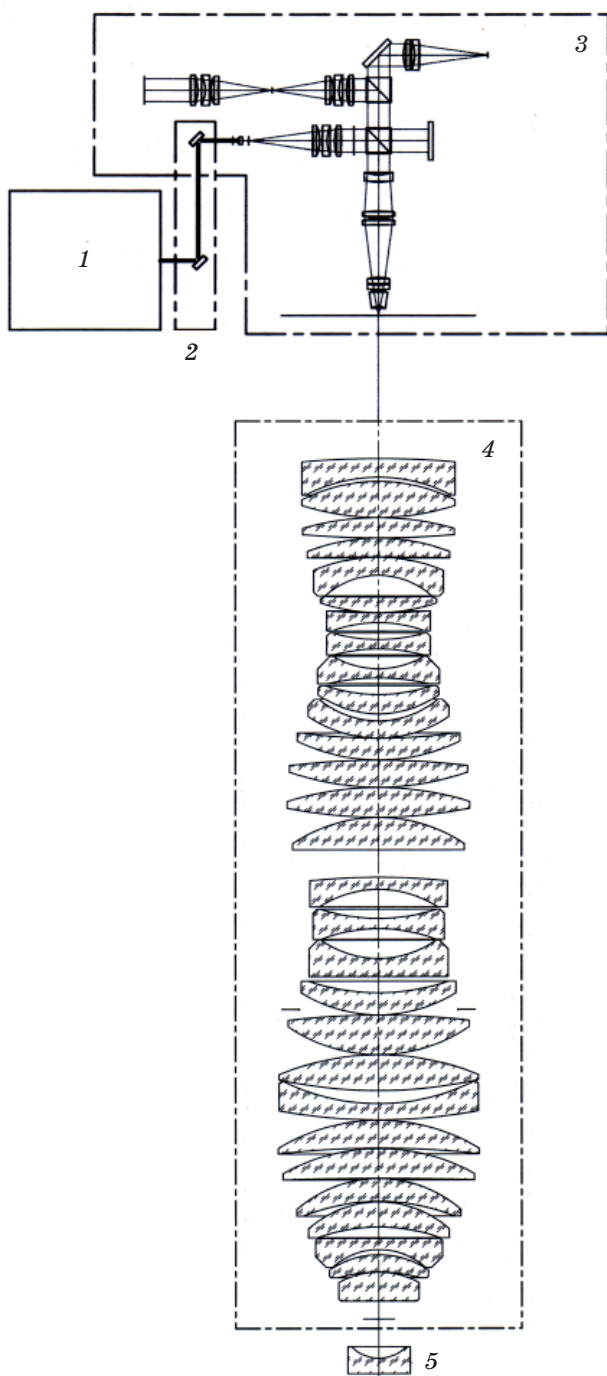
Поступила в редакцию 15.04.2010

### Введение

В настоящее время в отечественной оптической промышленности применяются технологии сборки, юстировки и контроля параметров крупногабаритных объективов различного назначения, работающих в видимом и инфракрасном (ИК) диапазонах спектра на основе восстановления и анализа двумерных волновых фронтов по интерферограммам [1] и по измерению дисторсии [2]. При создании высокоразрешающих оптических систем для ультрафиолетового (УФ) диапазона указанные технологии требуют существенного развития. Как правило, для УФ оптических систем весьма высокие требования предъявляются к точному измерению масштаба и дисторсионных искажений изображения, которые необходимо измерять интерференционными методами. Современные высокоразрешающие УФ системы, имеющие элементы автоматической юстировки и адаптации к переменным внешним условиям, требуют создания нового класса стендового оборудования и разработки новых методов и технологий их сборки и испытаний.

### Общая структура комплекса

По результатам анализа материалов разработки и создания высокоразрешающих УФ оптических систем предлагается следующая структура интерференционной системы (ИС) для контроля крупногабаритных УФ оптических систем. Оптическая схема контроля показана на рис. 1 и содержит: УФ лазер (1), систему транспортировки излучения (2), фазовый интерферометр (3), контролируемый объектив (4) и контрзеркало (5). Остановимся на описании и назначении основных элементов ИС. Интерферометр предназначен для регистрации волнового фронта объектива в автоколлимационном режиме на рабочей длине волны. Анализ волновых aberrаций объектива проводится по всему рабочему кадру. Для этого применяется сканирование путем перемещения блока интерферометра в плоскости, перпендикулярной оптической оси, и оптически сопряженного перемещения сферического зеркала (для проекционных объективов) или поворота плоского зеркала (для объективов, работающих с бесконечной дистанции). В процессе измерений



**Рис. 1.** Оптическая схема интерферометрического контроля объектива (пояснения в тексте).

производится съемка интерферограмм объектива в различных точках кадра. После расшифровки интерферограмм и анализа формы волнового фронта путем аппроксимации полиномами Цернике [3] определяются полная картина аберраций объектива и отклонение положения изображения по осям  $X$ ,  $Y$ ,  $Z$  в каждой точке кадра. По величинам отклонений и данным с интерферометрических датчиков перемещения блока

интерферометра и контрзеркала определяются масштаб изображения, дисторсия и кривизна поля изображения. Для систем, работающих из бесконечности, по данным угла наклона плоского зеркала и положения изображения определяется фокусное расстояние.

На рис. 2 показана функциональная схема интерферометрического стенда, реализующего данную процедуру измерения. Для получения высокой точности измерений необходимо обязательное выполнение следующих условий:

- 1) стенд должен располагаться в чистом термостатированном помещении;
- 2) несущая конструкция стенда должна быть развязана от фундамента полуактивными виброопорами, с помощью которых гасятся собственные колебания стенда;
- 3) необходим мониторинг и учет в результатах измерений климатических параметров (атмосферного давления, температуры, относительной влажности) в рабочем пространстве чистой мобильной зоны;
- 4) сеанс измерений должен проводиться в автоматическом режиме с дистанционным управлением от ПЭВМ, все узлы и модули стенда должны контролироваться с помощью программного обеспечения;

5) для определения случайных ошибок необходимо проводить регистрацию серии измерений с их последующей математической обработкой.

Порядок работ на стенде следующий: результаты измерений обрабатываются по специальной программе в соответствии с математической моделью контролируемой оптической системы. Параметры качества полученного изображения сравниваются с требуемыми значениями. При получении неудовлетворительных фактических результатов для компенсации аберраций производится изменение положения заранее выбранных коррекционных элементов оптической системы (ОС) за счет их перемещения вдоль или перпендикулярно оптической оси. Рассчитываются векторы этих перемещений и параметры качества изображения. При его улучшении выполняется изменение положения элементов. Далее цикл измерений и корректировки выполняется заново. Данная процедура выполняется неоднократно и повторяется до полного использования коррекционных возможностей. В случае, если этих действий недостаточно, применяется локальная ретушь оптических поверхностей. Такой путь гарантированно позволяет скомпенсировать все погрешности изготовления отдельных элементов и сборки оптической системы.

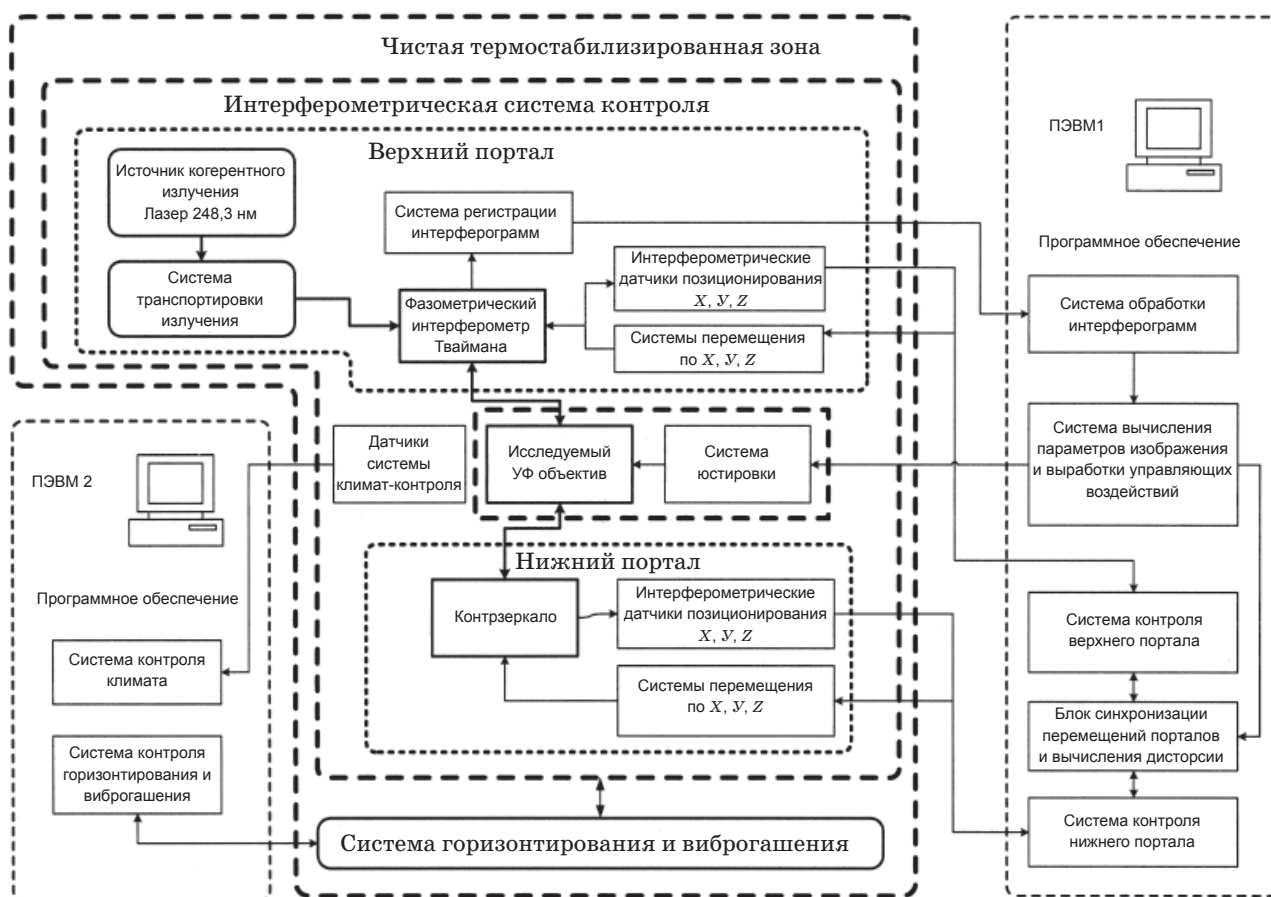


Рис. 2. Функциональная схема интерферометрического стенда.

Интерферометрический стенд позволяет проводить автоматизированный программно-корректируемый контроль объективов длиной до 1000 мм с наружным диаметром до 500 мм. Числовая апертура рабочего пучка на выходе из интерферометра равна 0,15. Для контроля объективов, работающих из бесконечности, применяется плоское контрзеркало диаметром 400 мм. Пределы перемещения координатных столов в горизонтальной плоскости составляют 150×150 мм. Точность измерения формы волнового фронта не хуже  $\lambda/50$  среднеквадратического отклонения (СКО), дисторсии не хуже 0,02 мкм. Далее кратко проанализируем технические параметры двух основных модулей интерферометрической системы: интерферометра и лазера.

### Интерферометр

Рассмотрим принцип работы интерферометра, построенного на основе схемы Тваймана–Грина со светоделительной призмой (рис. 3). В каче-

стве фазосдвигающего элемента использован пьезоэлемент, приводящий в движение плоское эталонное зеркало. С помощью чувствительной в широком спектральном диапазоне CCD камеры [4] регистрируется серия из нескольких интерферограмм с разными относительными сдвигами фазы [5]. Производится фильтрация когерентных шумов и спекловых структур, затем программным обеспечением по серии интерферограмм восстанавливается карта волнового фронта. По полученной топографии реального волнового фронта производится вычисление коэффициентов aberrаций и прогнозирование параметров качества изображения [1].

Собственная инструментальная погрешность оптической системы интерферометра при измерении деформаций волнового фронта проекционного объектива (ПО) в выбранной точке поля зрения не превосходит  $0,02\lambda$  СКО. Точность измерений обеспечивается процедурой калибровки интерферометра и исключением его собственных ошибок при вычислении деформаций волнового фронта измеряемого объектива.

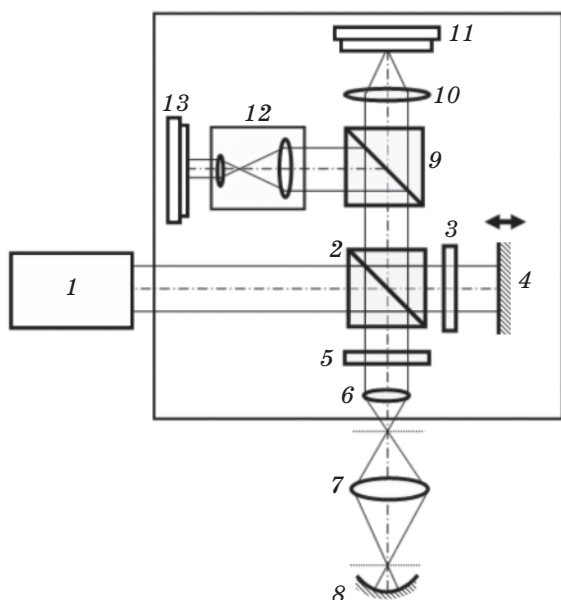


Рис. 3. Принципиальная оптическая схема интерферометра (пояснения в тексте).

Для повышения энергетической эффективности и контрастности в интерферометр дополнительно вводятся поляризационные элементы. В качестве светоделителя используется поляризационный светоделительный кубик, в оба канала вводится по четвертьволновой пластинке, на выходе устанавливается поляризатор. Кроме этого, предусмотрен дополнительный юстировочный канал для настройки интерферометра.

Принципиальная оптическая схема интерферометра (рис. 3) включает следующие функциональные элементы: 1 – лазер, 2 – поляризационный светоделитель, 3 – пластинка  $\lambda/4$ , 4 – фазосдвигающий элемент, 5 – пластинка  $\lambda/4$ , 6 – основной объектив рабочего пучка, 7 – контролируемый объектив, 8 – сферический отражатель (зеркало), 9 – светоделитель, 10 – объектив юстировочного канала, 11 – камера юстировочного канала, 12 – система локализации интерференционной картины, обеспечивающая перенос изображения зрачка проекционного объектива, 13 – узел приемной матрицы.

Интерферометр, источник лазерного излучения 1 и зеркало 8 образуют интерферометрическую систему для контроля исследуемого объектива 7. В системе переноса изображения используются конденсор, точечная диафрагма и объектив коллиматора, которые образуют телескопическую систему с пространственным фильтром.

## Диодные лазеры с учетверением частоты

Важнейшим элементом интерференционной системы является высококогерентный УФ лазер. Требования к лазерному источнику для интерферометрической системы включают: обеспечение мощности пучка 2–15 мВт, длина волны излучения 248 нм, большая длина когерентности (более 10 м), режим непрерывного излучения. Обычные для такой области спектра эксимерные лазеры дают низкое качество пучка в пространственной области (пространственная неравномерность), тогда как лазеры с модулятором добротности или лазеры с синхронизацией мод требуют больших пиковых мощностей.

В качестве источника излучения для УФ интерферометрической системы был выбран лазер TA-FHG-100 производства фирмы TORTECA [6, 7], который позволяет получать высококогерентное лазерное УФ излучение с длиной когерентности более 75 м. Принцип работы системы основан на использовании нелинейных кристаллов для удвоения частоты лазерного излучения. В лазере используется двухкаскадная схема удвоения частоты (рис. 4). Инфракрасное излучение генерируется в задающем диодном лазере 1 со стабилизированной решеткой и мощным полупроводниковым усилителем. Далее излучение попадает в систему из двух каскадированных блоков 2 и 3 умножения частоты для получения четвертой гармоники излучения. Лазерная система может быть настроена на длины волны в ультрафиолетовом диапазоне спектра от 205 нм до 260 нм в зависимости от типа задающего диодного лазера и используемых нелинейных кристаллов.

Результаты исследования основных параметров лазерного излучения и разработанного лазерного интерферометра показали, что длина

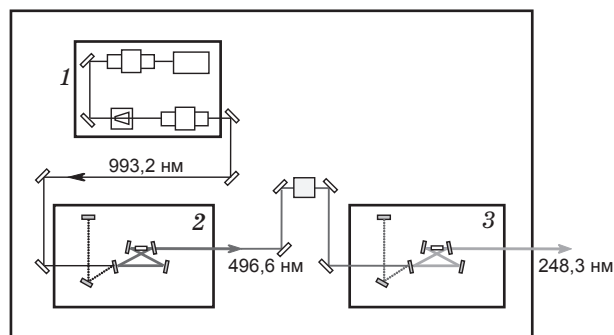


Рис. 4. Схема генерации четвертой гармоники (пояснения в тексте).

когерентности лазерного излучения превышает 10 м, длина волны 248,3 нм, диапазон тонкой подстройки длины волны составил 2 нм, мощность излучения достигала 15 мВт. В части пространственного распределения интенсивности требуется применение пространственной фильтрации лазерного излучения. Получена высококонтрастная интерференционная картина, которая позволяет применять автоматизированные методы обработки и анализа, например, метод фазовых шагов [8] или цифровой голографии [9]. В целом проведенные исследования подтвердили возможность использования лазерной системы типа ТА-FHG-100 в составе интерферометрического стенда.

### Заключение

Итогом проведения работ и исследований стало:

1. Разработка и обоснование технических характеристик интерферометрической системы для контроля крупногабаритных УФ оптических систем.

2. Разработка структуры основных модулей интерферометрической системы и методики ее применения для контроля деформаций волнового фронта УФ оптических систем и контроля дисторсионных искажений.

3. Предварительные исследования высококогерентного лазера ТА FHG-110 на основе двухкаскадного умножения частоты показали, что данный тип лазера можно использовать для построения УФ интерферометрических систем.

4. Реализация технических решений в конструкции интерферометрического стенда позволит использовать его для контроля УФ проекционных объективов длиной до 1000 мм с входной числовой апертурой 0,15 или объективов для работы с бесконечной дистанции с диаметром входного зрачка до 400 мм.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Ган М.А., Устинов С.И. Прогнозирование полихроматических характеристик качества изображения на основе измерения зрачковой функции // ОМП. 1990. № 2. С. 29–32.
2. Ган М.А., Устинов С.И., Котов В.В., Горбунов М.М. Анализ дисторсионных искажений неосесимметричных оптических систем // Оптический журнал. 1996. № 9. С. 36–40.
3. Борн М., Вольф Э. Основы оптики. М.: Наука, 1973. 719 с.
4. Вишневецкий Г., Выдревич М., Нестеров В., Ривкин В. Отечественные УФ и ИК ФПЗС и цифровые камеры на их основе // Электроника: наука, технология и бизнес. 2003. № 8. С. 18–22.
5. Reid G.T. Automatic Fringe Pattern Analysis: A Review // Optics and Lasers Engineering. 1986. V. 7. № 7. P. 53–68.
6. <http://www.toptica.com>
7. TA-FHG 110 Ultra-violet diode laser source. TOPTICA Photonics AG, BR-1302 TA-FHG 110 05-08.
8. Власов Н.Г., Штанько А.Е. Метод фазовых шагов. <http://bsfp.media-security.ru/school123/01.htm>.
9. Ган М.А., Ган Я.М., Чертков А.С. Восстановление топографии волнового фронта по интерферограмме с помощью метода цифровой голографии // Оптический журнал. 2006. № 7. С. 55–59.