

# МЕТОД НЕКОГЕРЕНТНОЙ ИНТЕРФЕРОМЕТРИИ ДЛЯ КОНТРОЛЯ КАЧЕСТВА ЗЕРКАЛ ПРЕЦИЗИОННЫХ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ СИСТЕМ

В.В. Азарова, Т.В. Цветкова

*Московский государственный институт электроники и математики (ТУ);*

*Научно-исследовательский институт «Полюс» им. М.Ф.Стельмаха*

*[azarovav@hotmail.ru](mailto:azarovav@hotmail.ru); [tvc-t@bk.ru](mailto:tvc-t@bk.ru)*

The modern method for testing of the precision optical details surface structure with using of white light interferometry is considered. Measurement results of laser gyroscopic mirrors profiles, received with help of the surface structures analyzer New View 6200, are discussed. The experimental dependences of the mode spectra of the laser ring resonators with a non-planar contour from size of deviations of mirrors structure from the set form are confirmed by the mathematical modeling.

## 1. Введение.

Оптические зеркала являются составной частью многих прецизионных измерительных систем, таких как лазерные гироскопы, гравитационные интерферометры, дальнометры, оптические многопроходные кюветы в лидарах и др. Точность изготовления поверхностей зеркал, их плоскостность, шероховатость, форма, в значительной степени определяют характеристики метрологических и тестовых установок, оптические схемы которых базируются на основе этих зеркал [1-3].

В работе рассматривается современный прецизионный неразрушающий метод контроля поверхностей зеркал, а именно шероховатости и профиля поверхностей. Путем сравнения экспериментальных зависимостей и результатов математического моделирования анализируется влияние отклонения формы зеркал на спектральные характеристики собственных типов колебаний кольцевых лазерных резонаторов с неплоским контуром, используемых в лазерных гироскопах с магнитооптической частотной подставкой.

## 2. Метод некогерентной интерферометрии.

Метод некогерентной интерферометрии или интерференции белого света, как его принято называть, основан на использовании двулучевого интерферометра, освещаемого излучением с широким спектром. В двулучевом интерферометре излучение разделяется на измерительную волну, отраженную от исследуемой поверхности и опорную волну, оптическая длина пути которой может изменяться при управляемом перемещении опорной поверхности. Интерференционные полосы наблюдаются при равенстве оптических длин пути измерительной и опорной волн в пределах длины когерентности излучения. Разрешающая способность по координате  $z$  зависит от длины когерентности источника излучения [4-6].

Современные интерферометры белого света базируются на оптических схемах 3-х основных видов интерференционных микроскопов: Линника,

Майкельсона и Захарьевского (Миро). Интерференция наблюдается в тех областях поверхности, где волновой фронт отраженной измерительной волны согласуется по кривизне с фронтом опорной волны. Поэтому метод иногда называют методом микроскопии с «корреляцией по фазе». При использовании излучения малой когерентности осуществляется дополнительная селекция слоя по высоте в пределах длины когерентности  $l_{\text{ког}}$  [4].

$$l_{\text{ког}} = \frac{\lambda_{\text{ср}}^2}{\Delta\lambda}, \quad (1)$$

где  $\lambda_{\text{ср}}$  – средняя длина волны спектра освещаемого излучения,  $\Delta\lambda$  – ширина спектра на уровне 0,5.

Для излучения суперлюминисцентных диодов, которые используются в качестве источников излучения в интерферометрах белого света, значение  $\frac{\Delta\lambda}{\lambda_{\text{ср}}} \approx 0,25$ . Размер локализованной области по глубине фокусировки зависит также от числовой апертуры объектива [7]:

$$\frac{d_z}{l_{\text{ког}}} = \frac{0,4 \Delta\lambda}{A^2 \lambda_{\text{ср}}}, \quad (2)$$

где  $d_z$  – размер локализованной области по глубине фокусировки;  
 $A$  – числовая апертура объектива.

### **3. Контроль профилей поверхностей зеркал с помощью прибора New View 6200 (NV).**

Сканирующий интерферометр белого света NV отображает, измеряет и обеспечивает структурный поверхностный анализ, не контактируя с исследуемой поверхностью. Интерферометр позволяет контролировать плоскостность, шероховатость и форму измеряемых объектов в области пространственных частот от  $10^{-4}$  до  $3 \text{ мкм}^{-1}$ . Точное определение положения максимума огибающей интерференционных полос позволяет повысить разрешающую способность по оси  $z$  до величины менее 0,1 нм.

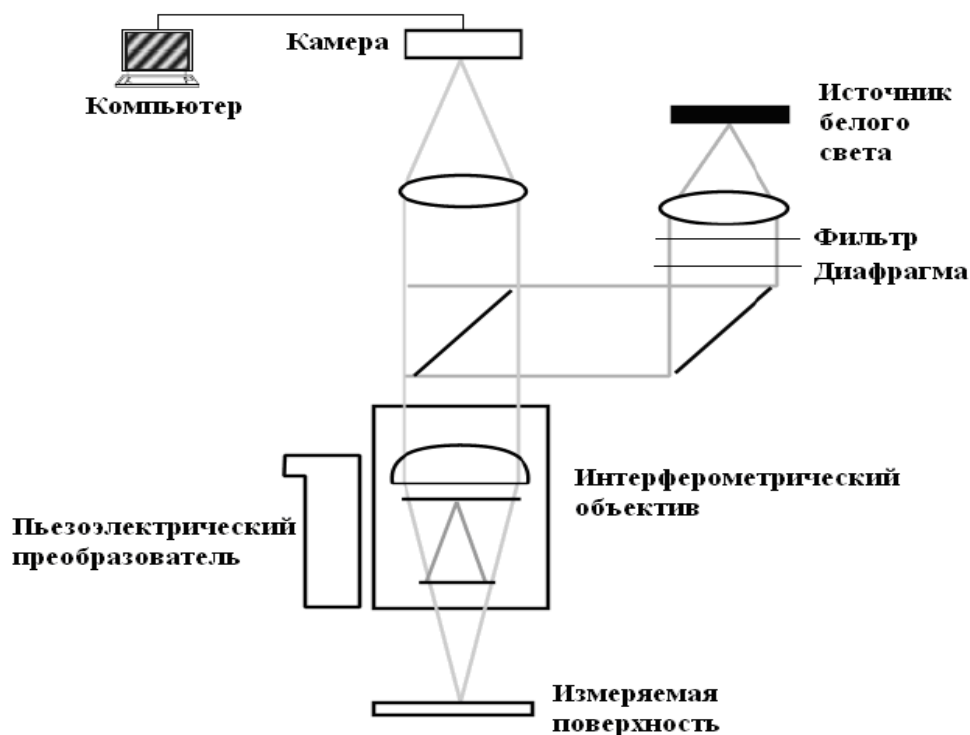


Рис. 1. Структурная схема оптической системы New View 6200

Структурная схема оптической системы NV приведена на рис.1. Источник белого света - светодиод высокой интенсивности - излучает волну, которая после прохода через фильтр в режиме измерений характеризуется следующими величинами: средней длиной волны 550 nm, спектральной шириной 125 nm и длиной когерентности 2,4  $\mu\text{m}$ . Волна проходит через диафрагму, ограничивающую поле зрения, используемую при фокусировке, отражается от поворотных зеркал и освещает интерференционный объектив. Интерференция в объективах создается делением света полупрозрачным зеркалом на два луча. Один луч отражается от внутренней высококачественной опорной поверхности, а другой – от измеряемой поверхности. Так как прибор представляет собой интерферометр, совмещенный с микроскопом, то для наблюдения интерференционной картины на экране монитора, фокусное расстояние должно совпадать с оптической длиной пути от опорной плоскости. Профиль исследуемой поверхности сканируется вертикальным перемещением объектива с помощью пьезоэлектрического преобразователя с емкостными датчиками высокой линейности. Видеосистема фиксирует интенсивности в каждом пикселе камеры, которые затем преобразовываются в карты высот с помощью программного обеспечения.

Длина сканирования определяет фактическую величину перемещения объектива. Чем больше будет длина сканирования, тем больше времени потребуется для сбора данных. При длине сканирования 5мкм, время сканирования – 1с. В приборе NV применяется биполярное сканирование. В течение сканирования объектива происходит сбор данных. Для сбора данных объектив должен быть сфокусирован приблизительно на середине линейного участка измерений, как это показано на рис.2.



Рис.2. Биполярное сканирование

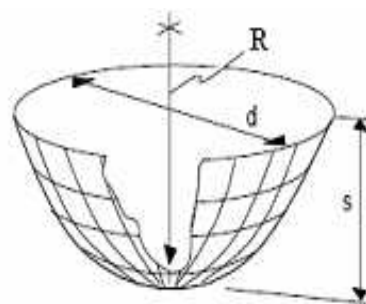


Рис. 3. Измерение радиуса кривизны

Из полученных данных расчёт радиуса кривизны проводится по формуле [4]:

$$R = \frac{S}{2} + \frac{\left(\frac{d}{2}\right)^2}{2S} \quad (3)$$

где  $d$  — диаметр пятнышка измерений,  $S$  — стрела прогиба, показанные на рис. 3.

Положительное значение радиуса кривизны соответствует выпуклой поверхности.

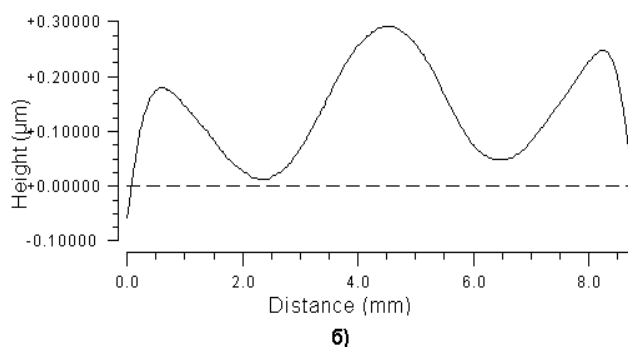
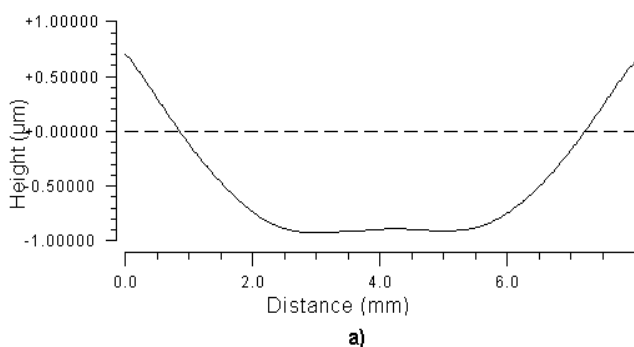


Рис.4. а) — профиль поверхности подложки зеркала с радиусом кривизны  $R = -4.89$  м; б) — результат вычитания сферы измеренного радиуса.

В качестве примера на рис. 4 а) и б) представлены результаты измерений профиля поверхности подложки сферического зеркала в координатах  $S$  и  $d$ , причем, на рис.4 б) показаны отклонения профиля поверхности от заданной формы.

Как видно из приведённых результатов, установка NV позволяет не только измерить профиль поверхности, но также и проанализировать его. Погрешность измерения радиуса кривизны зависит от используемого объектива и составляет доли процента.

#### 4. Влияние отклонения формы зеркал на характеристики кольцевых лазерных резонаторов с неплоским контуром.

Связь между формой зеркал и характеристиками лазерных резонаторов экспериментально изучалась на примере кольцевых 4-х зеркальных

резонаторов с неплоским контуром. Спектр собственных частот продольных мод таких резонаторов определяется выражением [7]:

$$\omega_{q_{\pm}} = 2\pi \cdot \nu_{q_{\pm}} = 2\pi \cdot \frac{C}{L} q_{\pm} = 2\pi \cdot \frac{C}{L} \left( l + \frac{\alpha_s}{2\pi} + \frac{\arg \lambda_{\pm}}{2\pi} \right), \quad (4)$$

где  $c$  – скорость света,  $q_{\pm}$  – продольный индекс с учётом поляризации моды,  $l$  – большое положительное число,  $\arg \lambda_{\pm}$  – набег фазы при полном обходе резонатора, с учётом фазовой анизотропии резонатора,  $\alpha_s$  – набег фазы при полном обходе резонатора, с учётом его сферичности.

$$\alpha_s = \arccos \sqrt{\left(1 - \frac{L}{R} \sec \theta\right) \left(1 - \frac{L}{R} \cos \theta\right)}.$$

Неплоский контур резонатора в общем случае выполняет две функции: во-первых, он обеспечивает формирование волн с круговой поляризацией. Во-вторых, в спектре собственных типов колебаний резонатора снимается вырождение по частотам, то есть обеспечивается взаимное расщепление частот волн с разными круговыми поляризациями: левой и правой. В плоском контуре такое расщепление исчезает, даже если и сформированы каким-либо образом волны с круговыми поляризациями [1].

Основываясь на математическом описании спектра мод (4) было проведено численное моделирование собственных частот кольцевого резонатора при искажении формы одного из зеркал резонатора. Из анализа модели видно, что сферичность резонатора проявляется только через член  $\alpha_s$ .

На рисунке (5) представлен профиль сферического зеркала, измеренный на установке NV, и проведено сравнение формы его с расчетной, полученной по формуле (3) для сферы радиуса кривизны 3,6 м.

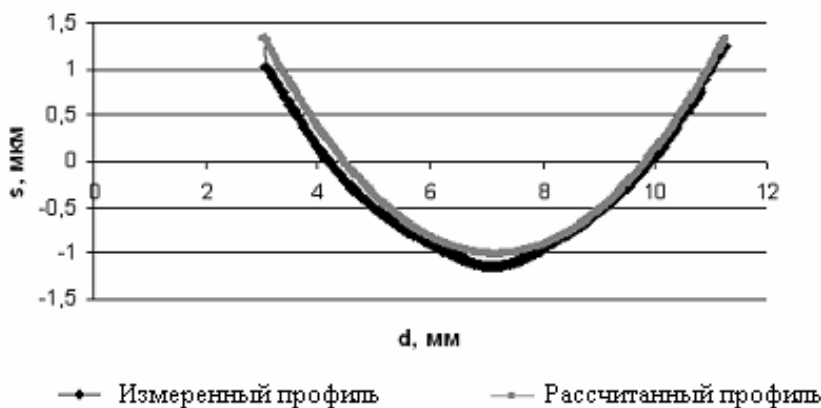
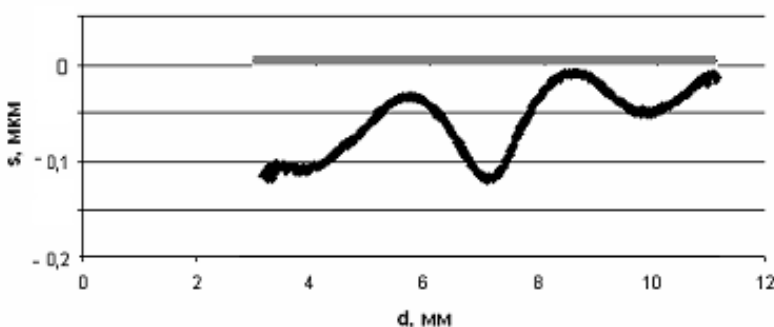


Рис.5.

а) -измеренный и рассчитанный профили зеркала с радиусом кривизны  $R=3,6$  м.



б) - отклонение от заданной формы зеркала, полученное путем вычитания расчётного профиля с радиусом  $(-3,6)$  м.

Использование зеркал с подобным искажением формы приводит к искажению спектра мод резонаторов. На рисунке (б) показаны спектры мод кольцевого пассивного резонатора, полученные при сканировании частоты излучения задающего лазера на установке юстировки и измерения добротности резонаторов, описанной в [8].

Анализ отклонений от сферичности (рис.5б) показывает, что локальная сферичность в пределах диаметра лазерного пучка на зеркале сильно изменяется. Величины локальных радиусов кривизны профиля, показанного на рисунке (5) и рассчитанного с помощью формулы (3), могут находиться в пределах приблизительно от -1м до -4м.

Численное моделирование показало, что такое изменение радиуса кривизны сферического зеркала может привести к расщеплению частот продольных мод кольцевого резонатора на величину порядка нескольких десятков мегагерц, что соответствует полученным в эксперименте результатам, представленным на рис.6 (а и б).

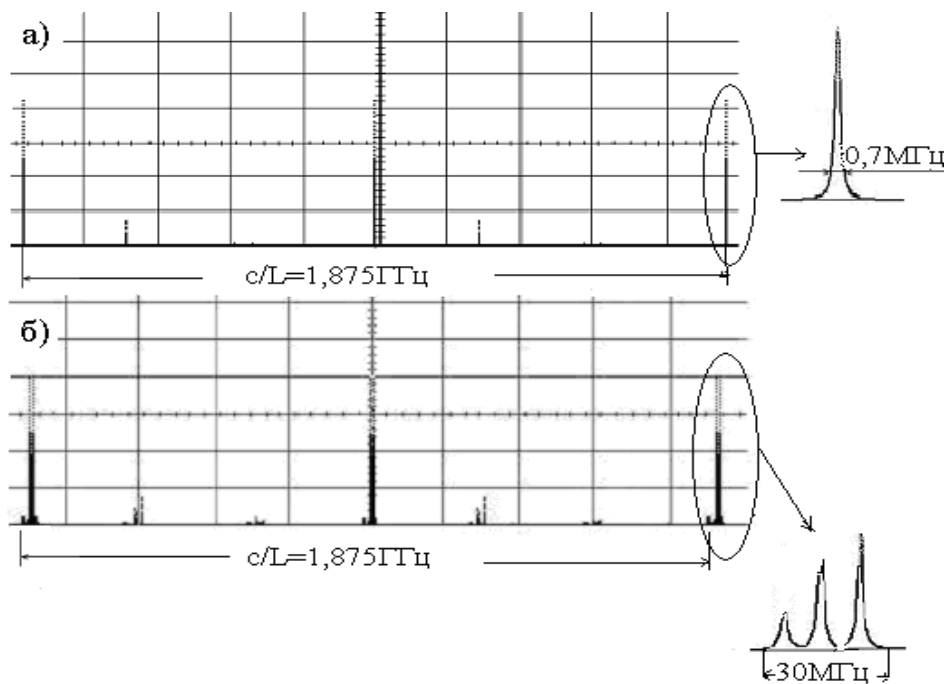


Рис. 6. а) - экспериментально полученный спектр мод в кольцевом пассивном резонаторе с зеркалами заданной формы. б) - расщеплённый спектр мод в том же резонаторе со сферическим зеркалом, форма которого показана на рисунке (5б).

Из сравнения спектров, представленных на рисунке 6(а и б) видно, что в первом случае (рис.6а) – моды нулевого порядка с правой и левой круговой поляризацией расположены на расстоянии  $C/2L$ , что соответствует расчетному состоянию. При наличии локального искажения формы зеркал в пределах диаметра рабочего пятна в резонаторе, не превосходящего 2 мм (см. например

рис.4 и 5), – происходит расщепление спектра мод в резонаторе. Величина расщепления согласуется с локальными радиусами сферичности в месте искажения формы зеркала. Использование таких резонаторов с микродефектами на зеркалах может привести к ошибке измерений скорости вращения объектов в лазерных гироскопических приборах.

### **Заключение**

В работе проведен метрологический анализ микропрофилей лазерных зеркал, основанный на неразрушающем методе контроля некогерентной интерферометрии с помощью «белого интерферометра». Проведённые экспериментальные исследования взаимосвязи измеренных профилей лазерных зеркал и спектров собственных типов колебаний резонаторов кольцевых лазеров с учетом снятия вырождения по поляризации, подтверждены путем численного моделирования. Анализ показал, что локальные искажения формы лазерных зеркал в пределах диаметра рабочего пятна на зеркале приводят к расщеплению спектра собственных частот лазерного резонатора, что, в свою очередь, может привести к ухудшению точности лазерных измерительных приборов.

В заключение авторы выражают благодарность Савельеву И.И. за полезные обсуждения результатов работы, а также Фокину В.В. за помощь в получении экспериментальных результатов, связанных с измерением спектра собственных типов колебаний пассивных кольцевых лазерных резонаторов.

Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (грант РФФИ 07-02-13662).

1. В.В.Азарова, Ю.Д.Голяев, В.Г.Дмитриев. Кольцевые газовые лазеры с магнитооптическим управлением в лазерной гироскопии. // Квантовая электроника, 30, №2, 2000.
2. С.Н.Андреев, И.В.Николаев, В.Н.Очкин, С.Ю.Савинов, М.В.Спиридонов, С.Н.Цхай. Диодная лазерная спектроскопия для измерения малых примесей в атмосфере. // Квантовая электроника, 37, №4, стр.399-404, 2007.
3. М.Н.Дубров, Лазерно-интерферометрические методы обнаружения предвестников природных географических явлений. // Труды XV Международной конференции «Высокие технологии в биологии, медицине и геоэкологии», 2007.
4. Н.И.Калитеевский. Волновая оптика. Изд. «Высшая школа», М,1973.  
Лансберг Г.С. Оптика. Изд. «Наука», М, 1976.
5. V.Bowe, V.Toal. White light interferometric surface profiler. // Opt.Eng. 37, №6, 1998.
6. В.П.Тычинский. Пространственное разрешение и сингулярности в фазовых изображениях. Готовится к печати.
7. И.И.Савельев, А.М.Хромых. Продольные моды объемного кольцевого резонатора. // Квантовая электроника, 3, №7, 1976.
8. В.В.Азарова, Н.А.Ефремова. Комплексный метод измерения потерь и усиления в активных и пассивных кольцевых лазерных резонаторах. // Квантовая электроника, т. 32, № 3, с. 239-242, 2002.