

электронный журнал

МОЛОДЕЖНЫЙ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ВЕСТНИК

Издатель: ФГБОУ ВПО «Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана»

Динамический интерферометр для контроля профилей оптических поверхностей нанометрового уровня

Н. В. Барышников, Д. Г. Денисов,

И. В. Животовский, Я. В. Гладышева,

А. А. Щербина

УДК 681.787.8

МГТУ имени Н. Э. Баумана
anton190691@gmail.com

В настоящее время крупные научно-технические достижения в области космических исследований в значительной степени достигнуты в результате создания современных астрономических телескопов [1]. Проектирование таких зеркал связано с серьезными технологическими трудностями, вызванными в первую очередь высокими требованиями предъявляемыми к качеству профилей подложек оптических поверхностей, характеризующимися величиной среднеквадратического значения отклонения поверхностных неоднородностей (шероховатостей) в пределах базовой длины и составляющей единицы и доли нанометров. Достижение такого качества профилей оптических поверхностей нанометрового уровня объясняется минимальным светорассеянием от них и как следствием качественного изображения в плоскости анализа, характеризуемого функцией рассеяния.

При разработке активных сред для мощных лазерных излучателей [2] также необходимо обеспечить высокое качество однородности материала и профиля формы. При разработке и аттестации в цеховых условиях (в условиях вибраций) вышеупомянутых оптических изделий создание метрологического оборудования контроля таких неоднородностей является первостепенной задачей.

Говоря о показателях качества оптических деталей можно показать [2], что поверхностная неоднородность классифицируется в зависимости от величины ее пространственного масштаба:

Таблица 1. Классификация поверхностных неоднородностей:

	Диапазон 1		Диапазон 2		Диапазон 3		Диапазон 4
Пространственный масштаб	400–33		33–2,5		2,5–0,12		0,12–0,01
Пространственная частота	$2,5 \times 10^{-3} - 3 \times 10^{-2}$		$3 \times 10^{-2} - 0,4$		0,4 – 8,3		8,3 – 100
Параметр	PV	rms градиент (нм/см)	Rq (rms) (нм)	A (нм ² × мм)	Rq (rms) (нм)	A (нм ² × мм)	Rq (rms) (нм)
Стекло	0,33	7	1,8	1,0	1,6	1,0	0,4

*
по материалам статьи NIF optical materials and fabrication technologies, 2004

В указанной таблице первый диапазон определяет расходимость лазерного излучения, второй и третий приводят к модуляции излучения, а четвертый приводит к потерям энергии и определяется статистическими характеристиками шероховатости поверхности.

Для измерения статистических параметров профилей оптических поверхностей разработаны различные методы и аппаратура, которые можно классифицировать на две группы: контактные и бесконтактные.

К первой относятся механические методы, в основе которых лежит ошупывание поверхности с помощью иглы (профилометр), а также сканирующего наноразмерного зонда или кантилевера (атомно-силовой микроскоп). Ко второй группе относятся оптические приборы контроля – интерференционные, рефлектометрические.

Контактные профилометры, использующие в качестве датчика иглу, ошупывающую контролируемую поверхность, применяются для контроля поверхности с шероховатостями от тысячных долей до сотен микрометров. Приборы этого типа чувствительны к вибрациям, не позволяют контролировать поверхности мягких материалов (алюминий, медь, серебро и т.д.), не могут быть применены для дистанционных измерений. В заводских условиях эти приборы позволяют контролировать плоские участки поверхности с высотой шероховатости более 0.05 мкм. Серьезной проблемой для этих приборов является контроль труднодоступных поверхностей (узкие и глубокие канавки и каналы).

Оптические рефлектометрические методы, основанные на связи между параметрами шероховатости и характеристиками отраженного света, проще по технической реализации, поэтому аппаратура этого класса дешевле в изготовлении и легче в эксплуатации, меньше подвержена вибрациям, однако она сильно зависит от параметров источника излучения, чувствительна к формирующейся спекл-структуре. А главное, результаты измерения для каждого материала свои и зависят не только от шероховатости, но и от типа контролируемой поверхности, что накладывает систематические ограничения. Кроме того данный метод не позволяет получить

карту профиля поверхности, что очень важно при производстве, так как на основании карты профиля деталь отправляется на автоматизированную доработку.

Атомно-силовая микроскопия и классическая оптическая микроинтерферометрия позволяют получать топографию поверхности в интервале высот микронеровностей от десятитысячных долей, до нескольких микрометров. Приборы этого типа весьма чувствительны к вибрациям и применяются только в лабораторных условиях. Интерферометрическим методом теоретически можно получить наиболее точную количественную информацию о фазовом искажении волнового фронта. Это объясняется тем, что погрешность волнового фронта можно измерить с точностью до $\lambda/1000$ [4].

В связи с этим при разработке и создании аппаратуры, позволяющей дистанционно (бесконтактно) контролировать показатели шероховатости поверхности в цеховых условиях при наличии вибраций, являющейся актуальной научной задачей, целесообразно базироваться на интерференционных методах.

Так например, для решения данной проблемы компания 4D Technology разработала динамический фазовый интерферометр, работающий в условиях вибраций[3]. Функциональная схема такого интерферометра показана на рисунке 1:

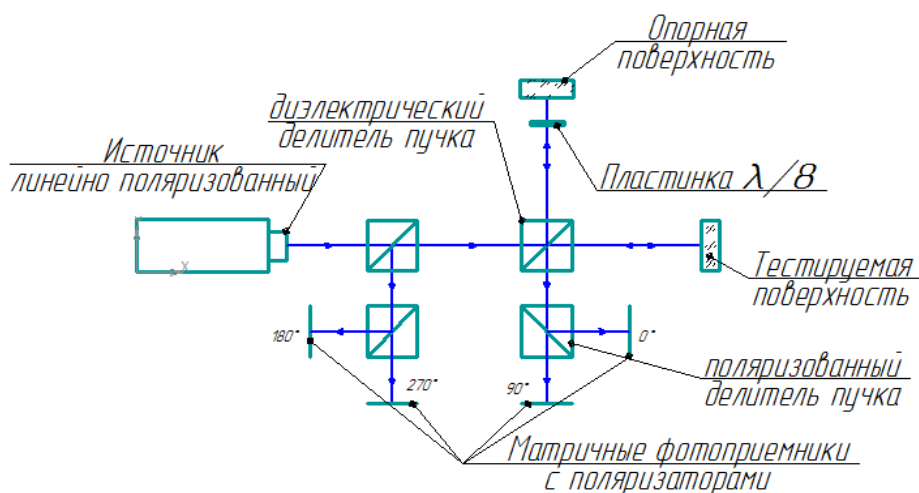


Рис. 1 Функциональная схема динамического интерферометра

Принцип действия данного прибора основан на мгновенной регистрации четырех интерференционных картин, полученных при интерференции световых пучков, обладающих различной поляризацей.

На данной схеме приемники излучения разнесены, и на каждый из них приходится излучение со своей поляризацией. В данной системе 4D Technology использует одну сложную поляризационную маску, которая располагается непосредственно перед приемной матрицей и выполняет роль вращателя плоскости поляризации. За счет этой маски, а также высокоскоростной камеры, по заверениям разработчиков достигается высокая точность и нечувствительность к вибрациям. При проектировании такого прибора основную сложность представляет технология изготовления поляризационной маски, сведения о которой весьма ограничены. Настоящая производственно-технологическая база не позволяет наладить конкурентоспособное производство такой маски, состоящей из микрополяризационных элементов, расположенных в заданном порядке. Поэтому на базе прототипа компании 4D Technology было предложено схмотехническое решение, позволяющее заменить поляризационную маску на более простой элемент – электрооптический модулятор (ЭОМ)

Рассмотрим принцип действия предложенного интерферометра, построенного на базе функциональной схемы интерферометра Линника, представленной на рисунке 2:

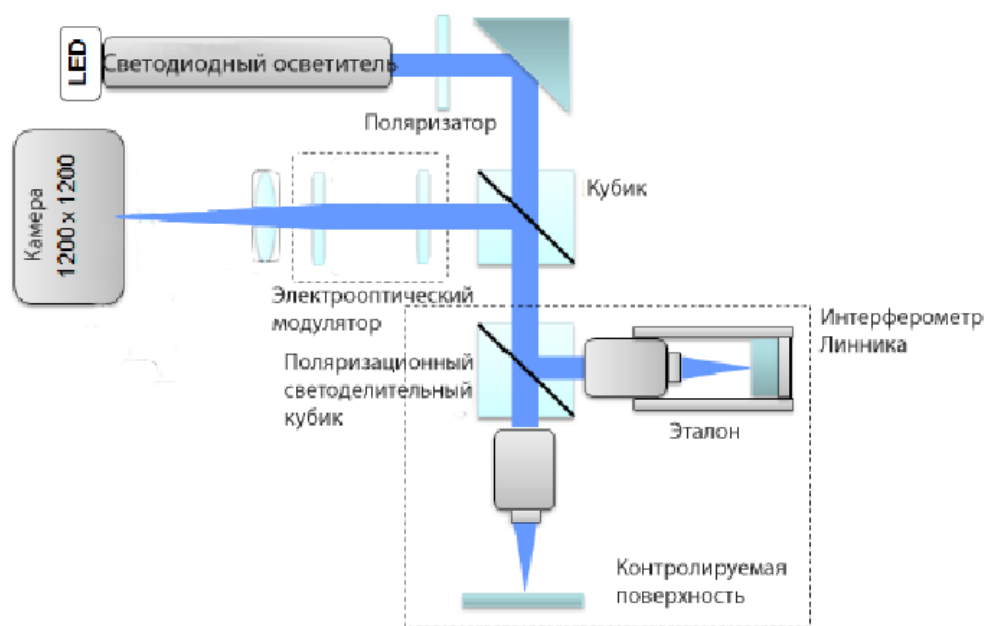


Рис. 2 Схема интерферометра с ЭОМ

Свет от светодиода пойдя через линейный поляризационный фильтр и светоделитель попадает на поляризационный светоделительный кубик и разделяется на эталонный и тестовый пучки со взаимно ортогональной поляризацией. Затем отразившись от эталонной и контролируемой поверхностей, они собираются в общий канал и попадают на электрооптический модулятор. ЭОМ состоит из оптического анизотропного кристалла – нормально ориентированной пластинки, которая под действием подаваемого напряжения вносит различную разность фаз, и

четвертьволновой пластинки. Такой электрооптический модулятор при определенных условиях представляет собой вращатель плоскости поляризации.

Затем модулированный по фазе сигнал поступает на приемную матрицу. Таким образом, матрицей регистрируется интерференционная картина, где каждый пиксель соответствует некоторой точке в пространстве предметов. А благодаря модуляции собирается статистические данные, то есть разные интерференционные картины, для одного участка поверхности. Таким образом, появляется возможность регистрации малых высот с большой точностью.

На рисунке 3 схематично представлено распределение интенсивности результирующего интерференционного поля в зависимости от поданного напряжения. Однако для того чтобы избежать влияния вибраций необходимо производить съемку кадров с частотой превышающей частоты колебаний поверхности. Для этого вполне подходят современные высокоскоростные камеры.

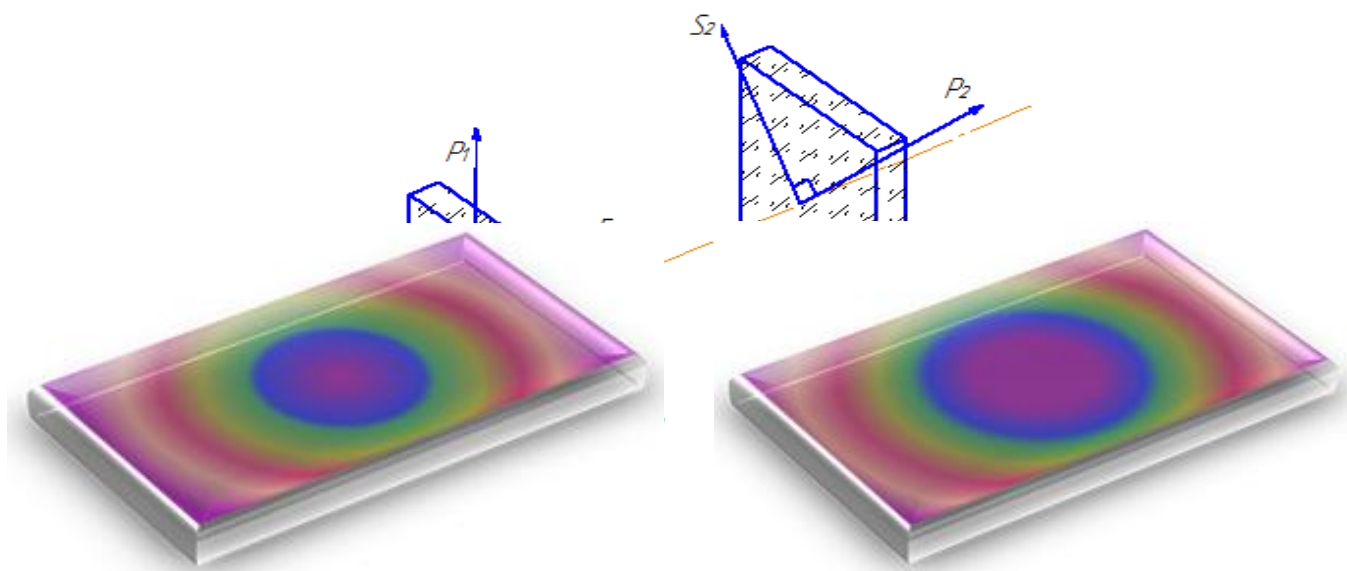


Рис. 3 Схематичное распределение интенсивности интерференционной картины в плоскости ПЗС матрицы с различной разностью фаз между интерферирующими пучками

Рассмотрим преобразования волн в ЭОМ (см. Рисунок 4).

Рис. 4 Схема ориентации осей ЭОМ

Пусть падающая волна имеет амплитуду E_0 , тогда волна, приходящая от эталона падает на электрооптический кристалл так, что вектор поляризации наклонен под углом 45 градусов к осям кристалла – для наилучшего контраста. Эта волна трансформируется на две ортогонально поляризованные компоненты с разностью фаз, регулируемой подаваемым напряжением:

$$E_{p1} = \frac{E_0}{\sqrt{2}} \cos \left(wt + \frac{\pi U}{2 U_{\lambda/2}} \right) \quad (1)$$

$$E_{s1} = \frac{E_0}{\sqrt{2}} \cos \left(wt - \frac{\pi U}{2 U_{\lambda/2}} \right) \quad (2)$$

Где $U_{\lambda/2}$ это напряжение при котором фаза меняется на π .

Затем обе волны преобразуются четверть волновой пластинкой также на 2 составляющие, но с фиксированной разностью фаз $\pi/2$:

$$E_{p1p2} = \frac{E_0}{\sqrt{2}\sqrt{2}} \cos \left(wt + \frac{\pi U}{2 U_{\lambda/2}} + \frac{\pi}{2} \right) \quad (3)$$

$$E_{p1s2} = \frac{E_0}{\sqrt{2}\sqrt{2}} \cos \left(wt + \frac{\pi U}{2 U_{\lambda/2}} + 0 \right) \quad (4)$$

$$E_{s1p2} = \frac{E_0}{\sqrt{2}\sqrt{2}} \cos \left(wt - \frac{\pi U}{2 U_{\lambda/2}} + \frac{\pi}{2} \right) \quad (5)$$

$$E_{s1s2} = \frac{E_0}{\sqrt{2}\sqrt{2}} \cos \left(wt - \frac{\pi U}{2 U_{\lambda/2}} + 0 \right) \quad (6)$$

Соответственно интерферировать будут однонаправленные компоненты, как показано на рисунке 5, а именно слагаемые, определённые формулами (3) и (5):

$$E_{p2} = \frac{E_0}{2} \cos \left(wt + \frac{\pi U}{2 U_{\lambda/2}} + \frac{\pi}{2} \right) + \frac{E_0}{2} \cos \left(wt - \frac{\pi U}{2 U_{\lambda/2}} + \frac{\pi}{2} \right) = \frac{E_0}{2} \cdot 2 \cos \left(wt + \frac{\pi}{2} \right) \cos \left(\frac{\pi U}{2 U_{\lambda/2}} \right) \quad (7)$$

$$E_{p2} = -E_0 \sin(wt) \cos\left(\frac{\pi U}{2 U_{\lambda \frac{1}{2}}}\right) \quad (8)$$

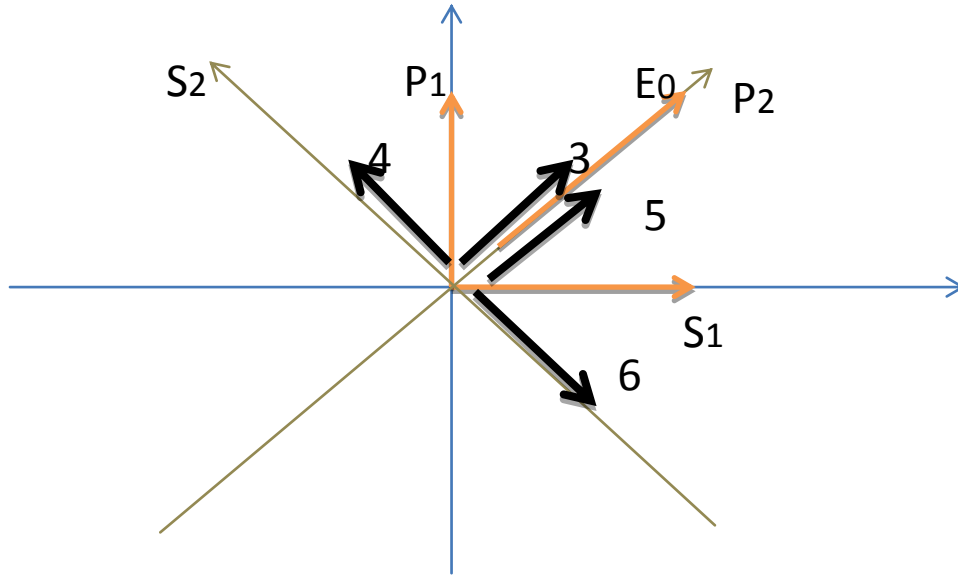


Рис. 5 Векторная диаграмма преобразований излучения отражённого от эталонной поверхности (цифровые обозначения на рисунке соответствуют обозначениям формул)

а также (4) и (6):

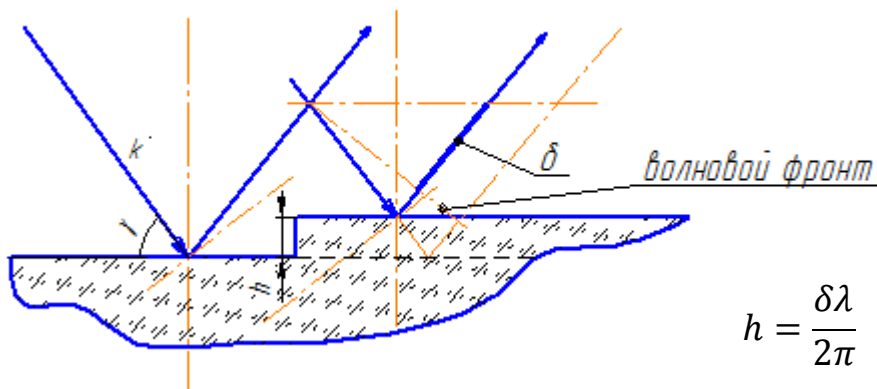
$$E_{s2} = \frac{E_0}{2} \cos\left(wt + \frac{\pi U}{2 U_{\lambda \frac{1}{2}}}\right) - \frac{E_0}{2} \cos\left(wt - \frac{\pi U}{2 U_{\lambda \frac{1}{2}}}\right) = -\frac{E_0}{2} \cdot 2 \sin(wt) \sin\left(\frac{\pi U}{2 U_{\lambda \frac{1}{2}}}\right) \quad (9)$$

$$E_{s2} = -E_0 \sin(wt) \sin\left(\frac{\pi U}{2 U_{\lambda \frac{1}{2}}}\right) \quad (10)$$

Волна, отраженная от исследуемой поверхности определяется аналогично, но с учетом разности фаз δ , возникшей на вариациях поверхностных неоднородностей (см. рисунок 6):

$$E_{p1} = \frac{E_0}{\sqrt{2}} \cos\left(wt + \frac{\pi U}{2 U_{\lambda \frac{1}{2}}} + \delta\right) \quad (11)$$

δ)



$$E_{s1} = \frac{E_0}{\sqrt{2}} \cos\left(wt - \frac{\pi U}{2 U_{\lambda \frac{1}{2}}} + \delta\right)$$

$$h = \frac{\delta \lambda}{2\pi}$$

Рис. 6 Геометрическое приближение набега фазы на микронеровности

Затем обе волны разложатся четверть волновой пластинкой также на 2 составляющие, но с фиксированной разностью фаз $\pi/2$:

$$E_{p1p2} = \frac{E_0}{\sqrt{2}\sqrt{2}} \cos\left(wt + \frac{\pi U}{2 U_{\lambda \frac{\lambda}{2}}} + \delta\right) \quad (13)$$

$$E_{p1s2} = \frac{E_0}{\sqrt{2}\sqrt{2}} \cos\left(wt + \frac{\pi U}{2 U_{\lambda \frac{\lambda}{2}}} + \frac{\pi}{2} + \delta\right) \quad (14)$$

$$E_{s1p2} = \frac{E_0}{\sqrt{2}\sqrt{2}} \cos\left(wt - \frac{\pi U}{2 U_{\lambda \frac{\lambda}{2}}} + \delta\right) \quad (15)$$

$$E_{s1s2} = \frac{E_0}{\sqrt{2}\sqrt{2}} \cos\left(wt - \frac{\pi U}{2 U_{\lambda \frac{\lambda}{2}}} + \frac{\pi}{2} + \delta\right) \quad (16)$$

Соответственно интерферировать будут однонаправленно-поляризованные компоненты (рис. 7), определяемые формулами: (13) и (15):

$$E_{p2} = \frac{E_0}{2} \cos\left(wt + \frac{\pi U}{2 U_{\lambda \frac{\lambda}{2}}} + \delta\right) + \frac{E_0}{2} \cos\left(wt - \frac{\pi U}{2 U_{\lambda \frac{\lambda}{2}}} + \delta\right) = \frac{E_0}{2} \cdot 2 \cos(wt + \delta) \cos\left(\frac{\pi U}{2 U_{\lambda \frac{\lambda}{2}}}\right) \quad (17)$$

$$E_{p2} = E_0 \cos(wt + \delta) \cos\left(\frac{\pi U}{2 U_{\lambda \frac{\lambda}{2}}}\right) \quad (18)$$

а также (14) и (16):

$$E_{s2} = \frac{E_0}{2} \cos \left(wt + \frac{\pi U}{2 U_{\lambda \frac{\lambda}{2}}} + \frac{\pi}{2} + \delta \right) - \frac{E_0}{2} \cos \left(wt - \frac{\pi U}{2 U_{\lambda \frac{\lambda}{2}}} + \frac{\pi}{2} + \delta \right) = -\frac{E_0}{2} \cdot$$

$$\cdot 2 \sin \left(wt + \frac{\pi}{2} + \delta \right) \sin \left(\frac{\pi U}{2 U_{\lambda \frac{\lambda}{2}}} \right) = -E_0 \cos(wt + \delta) \sin \left(\frac{\pi U}{2 U_{\lambda \frac{\lambda}{2}}} \right) \quad (19)$$

$$E_{s2} = -E_0 \cos(wt + \delta) \sin \left(\frac{\pi U}{2 U_{\lambda \frac{\lambda}{2}}} \right) \quad (20)$$

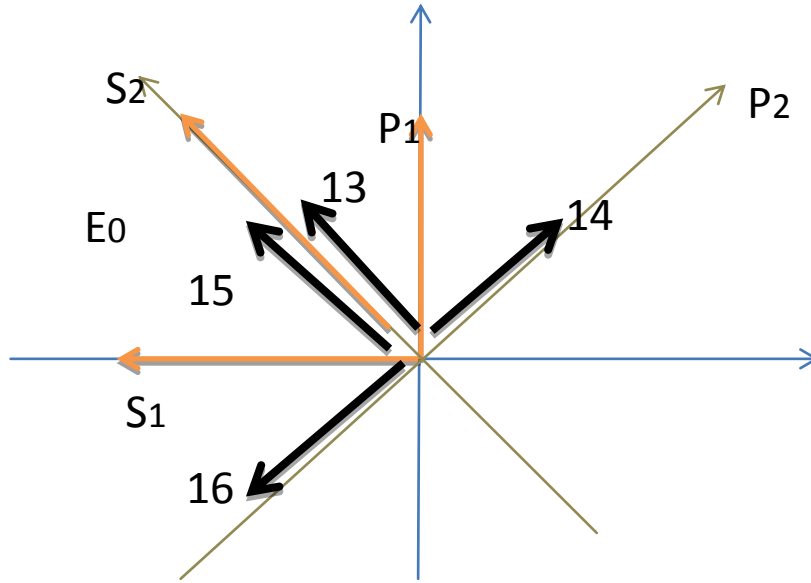


Рис. 7 Векторная диаграмма преобразований излучения отражённого от контролируемой поверхности (цифровые обозначения на рисунке соответствуют обозначениям формул)

В результате интерференции пучков от эталонного и контролируемого зеркал, для результирующего интерференционного поля можно записать:

для (3), (5), (14), (16) компонент:

$$E_I = -E_0 \sin(wt) \cos \left(\frac{\pi U}{2 U_{\lambda \frac{\lambda}{2}}} \right) - E_0 \cos(wt + \delta) \sin \left(\frac{\pi U}{2 U_{\lambda \frac{\lambda}{2}}} \right) \quad (21)$$

Для (4), (6), (13), (15) компонент:

$$E_{II} = -E_0 \sin(wt) \sin \left(\frac{\pi U}{2 U_{\lambda \frac{\lambda}{2}}} \right) + E_0 \cos(wt + \delta) \cos \left(\frac{\pi U}{2 U_{\lambda \frac{\lambda}{2}}} \right) \quad (21)$$

E_I и E_{II} поляризованы ортогонально и независимы друг от друга. Каждая несет в себе информацию о фазовом искажении. Поэтому рассмотрим одну из них, например первую:

$$\begin{aligned}
E_I &= -E_0 \sin(wt) \cos\left(\frac{\pi U}{2 U_{\lambda/2}}\right) - E_0 \cos(wt + \delta) \sin\left(\frac{\pi U}{2 U_{\lambda/2}}\right) = \\
&= -E_0 \left(\sin(wt) \cos\left(\frac{\pi U}{2 U_{\lambda/2}}\right) + \cos(wt) \cos(\delta) \sin\left(\frac{\pi U}{2 U_{\lambda/2}}\right) - \sin(wt) \sin(\delta) \sin\left(\frac{\pi U}{2 U_{\lambda/2}}\right) \right) = \\
&= -E_0 \left(\sin(wt) \left(\cos\left(\frac{\pi U}{2 U_{\lambda/2}}\right) - \sin(\delta) \sin\left(\frac{\pi U}{2 U_{\lambda/2}}\right) \right) + \cos(wt) \cos(\delta) \sin\left(\frac{\pi U}{2 U_{\lambda/2}}\right) \right) = \\
&= -E_0 \sqrt{\left(\cos\left(\frac{\pi U}{2 U_{\lambda/2}}\right) - \sin(\delta) \sin\left(\frac{\pi U}{2 U_{\lambda/2}}\right) \right)^2 + \left(\cos(\delta) \sin\left(\frac{\pi U}{2 U_{\lambda/2}}\right) \right)^2} \cdot \sin(wt + \psi) \quad (22)
\end{aligned}$$

исходя из известной формулы сложения гармонических колебаний,

$$\text{где } \psi = \arctg \left(\frac{\cos(\delta) \sin\left(\frac{\pi U}{2 U_{\lambda/2}}\right)}{\cos\left(\frac{\pi U}{2 U_{\lambda/2}}\right) - \sin(\delta) \sin\left(\frac{\pi U}{2 U_{\lambda/2}}\right)} \right) \quad (23)$$

В итоге найдем интенсивность результирующего интерференционного поля:

$$I_I = |E_I|^2 = E_0^2 \left(\left(\cos\left(\frac{\pi U}{2 U_{\lambda/2}}\right) - \sin(\delta) \sin\left(\frac{\pi U}{2 U_{\lambda/2}}\right) \right)^2 + \left(\cos(\delta) \sin\left(\frac{\pi U}{2 U_{\lambda/2}}\right) \right)^2 \right) \quad (24)$$

Зная интенсивность можно выразить разность фаз, которая однозначно связана с высотой шероховатости поверхности:

$$\delta = \arcsin \left(\frac{E^2 \cdot \cos\left(\frac{\pi U_H}{2}\right)^2 + E^2 \cdot \sin\left(\frac{\pi U_H}{2}\right)^2 - I}{E^2 \cdot \sin(\pi U)} \right) \quad (25)$$

$$h = \frac{\lambda}{2\pi} \cdot \arcsin \left(\frac{E^2 \cdot \cos\left(\frac{\pi U_H}{2}\right)^2 + E^2 \cdot \sin\left(\frac{\pi U_H}{2}\right)^2 - I}{E^2 \cdot \sin(\pi U)} \right) \quad (26)$$

$$\text{где } U_H = \frac{U}{U_{\lambda/2}}$$

Таким образом, подавая различное напряжение на модулятор и меняя тем самым разность фаз, после регистрации интенсивности в каждой точке, можно получить статистический набор высот, который позволяет значительно точнее определять истинное значение высот шероховатости. Например, по нескольким точкам можно построить график и применить аппроксимацию. Чем больше «точек» по напряжению регистрируется, тем точнее получится результат. Преимущество данного метода в том, что физически количество точек не ограничено, так как изменять напряжение можно непрерывно, ограничения накладываются лишь частотой съема камеры.

Проанализируем графически полученные выражения. Рассмотрим зависимость интенсивности на матрице от подаваемого напряжения на модулятор по формуле (9), при следующих исходных данных: пусть

$$h = 1 \cdot 10^{-9} \text{ м}; \delta = 2\pi \frac{h}{\lambda}; \lambda = 500 \cdot 10^{-9} \text{ м}; E=1;$$

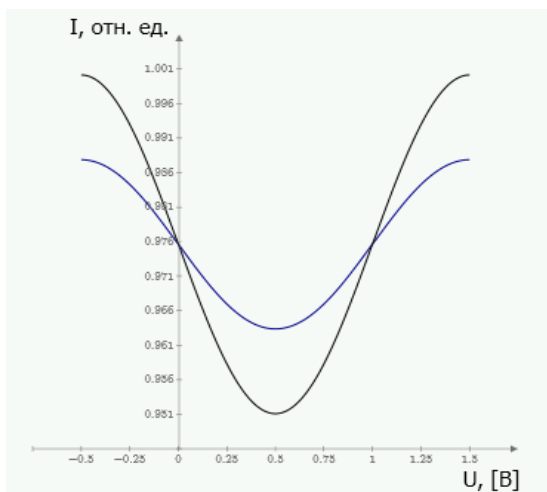


Рис. 8 Интенсивность интерференционной картины двух соседних точек объекта, имеющих разность высот 1 нм

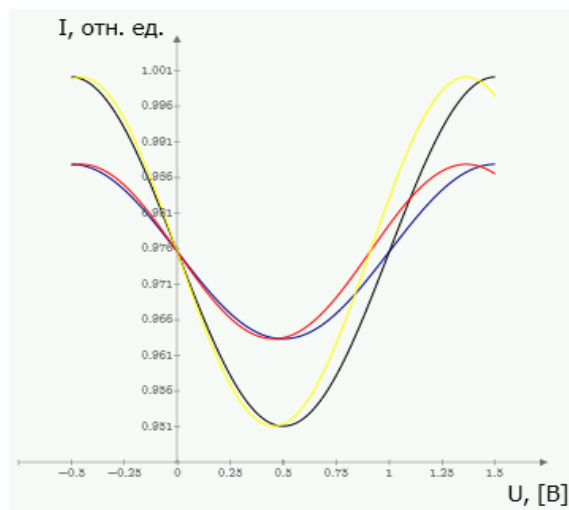


Рис. 9 Интенсивность интерференционной картины двух соседних точек объекта при отклонении напряжения на 10%

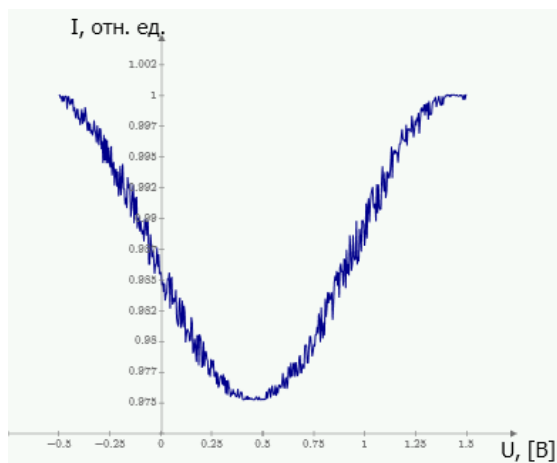


Рис. 10 Интенсивность интерференционной картины двух соседних точек объекта при шумовом колебании напряжения в пределах 10%

интенсивности результирующего интерференционного поля от напряжения в двух точках с разностью высот в 1 нм. Видно, что графики не смещаются, а масштабируются по интенсивности. В пределах заданного масштаба (а на практике коэффициента усиления), две точки различимы по высоте. Рисунок 9 показывает, что при изменении напряжения на 10%, например, при нестабильности источника, график для второй пары точек смещается параллельно первой, а так как определяющим является разность высот,

нестабильность не повлечет к серьезной ошибке. Также это можно проиллюстрировать графиком напряжения по шумовому току, который колеблется в пределах 10% - рисунок 10.

Видно, что характер графика сохраняется и после усреднения мы получим значение без влияния шума.

Также можно рассмотреть воздействие вибрации и предельную амплитуду. На рисунке 11 представлен результат при амплитуде вибрации превышающей шероховатость в 10 раз. На рисунке 11 в 100 раз. В этом случае при наличии достаточного количества замеров можно аппроксимировать кривые и получить

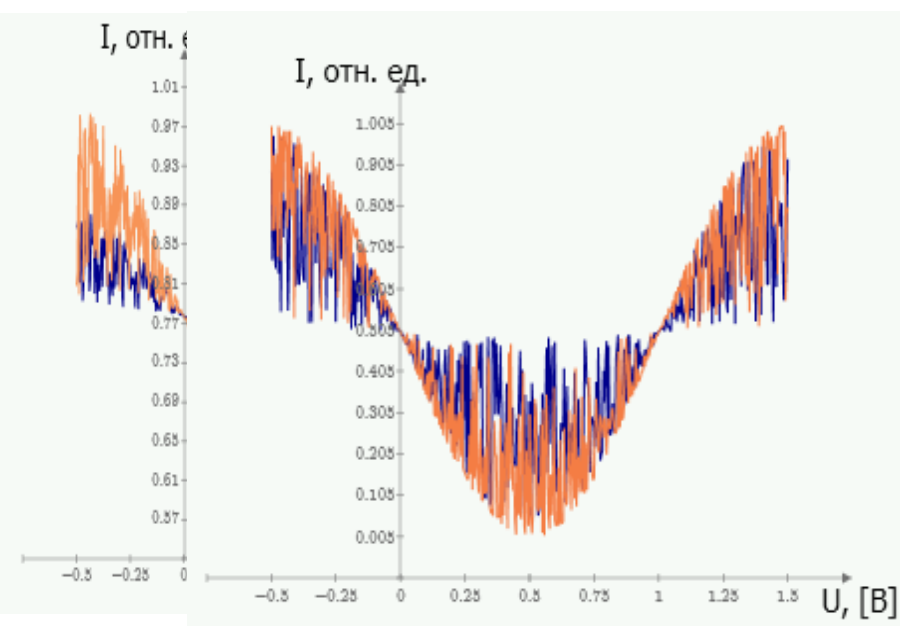


Рис 11. Разброс интенсивности интерференционной картины двух соседних точек объекта при амплитуде вибраций превышающей измеряемую шероховатость в 10 раз
Рис. 12 Разброс интенсивности интерференционной картины двух соседних точек объекта при амплитуде вибраций превышающей измеряемую шероховатость в 100 раз

правильный результат. Однако, превышении колебаний в 400 раз

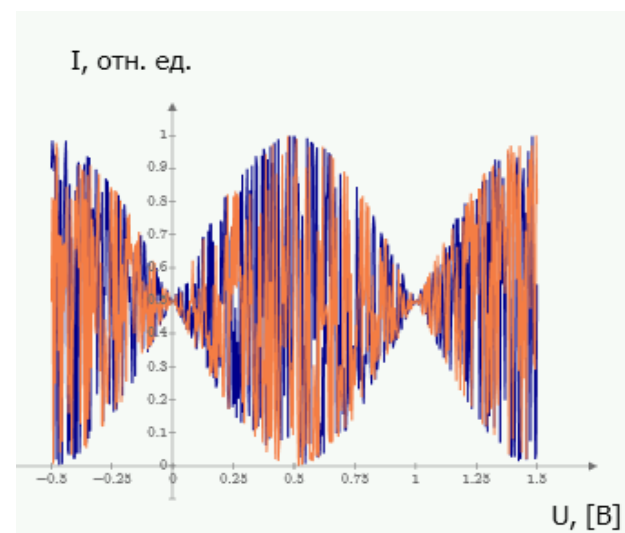


Рис. 13 Разброс интенсивности интерференционной картины двух соседних точек объекта при амплитуде вибраций превышающей измеряемую шероховатость в 400 раз

аппроксимация не поможет (рисунок 13), единственная возможность в данном случае это увеличение длины волны.

Возвращаясь к указанной классификации неоднородностей (табл.1) можно показать, что данный прибор при выбранном линейном поле в 4.4 мм и матрице 1200*1200 пикселей позволит контролировать поверхность в пределах 3 и 4 диапазона поверхностной неоднородности: размер пикселя в пространстве предметов $a = \frac{4.4}{1200} = 3.66 \text{ мкм}$

Что соответствует пространственной частоте Найквиста:

$$\nu_{\text{найкв}} = \frac{1}{2a} = \frac{1}{2 \cdot 3.66 \text{ мкм}} = 136 \text{ мм}^{-1}$$

Тогда получаемый диапазон измеряемых пространственных частот:

$$\nu_{\min} = \frac{1}{4.4} = 0.227 \text{ мм}^{-1}$$

$$\nu_{\max} = 136 \text{ мм}^{-1}$$

В результате проведенного исследования в работе, было предложено схемотехническое решение по созданию динамического интерферометра для контроля качества поверхностей оптических деталей в пределах третьего и четвертого диапазонов в соответствии с классификацией неоднородностей. Предложенный метод позволяет построить функциональную схему на базе известного и изученного элемента (электрооптического модулятора). Кроме того произведённое оценочное моделирование говорит о высоких чувствительных характеристиках и хорошей ветроустойчивости к внешним воздействиям.

Список литературы:

- 1) Магомед А. Абдулкадыров, Сергей П. Белоусов, Александр Н. Игнатов. ЛЗОС «Изготовление крупногабаритной оптики наземного и космического базирования»
- 2) J. H Campbell, R. A. Haweley-Fedder, C. J. Stolz «NIF optical materials and fabrication technologies: An overview» SPEI vol. 5341
- 3) Brad Kimbrough, Neal Brock, James Millerd «Dynamic surface roughness profiler» SPIE Vol. 8126
- 4) N. B. Voznesensky, Kyeong-Hee Lee, V. K. Kirillovsky, Proc. SPIE, 5252
- 5) В. Е. Карасик. Конспект лекций «Проектирование ОЭП»