электронный журнал
МОЛОДЕЖНЫЙ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ВЕСТНИК
Издатель ФГБОУ ВПО "МГТУ им. Н.Э. Баумана". Эл No. ФС77-51038.

 # 06, июнь 2016

УДК 681.7.062.42

Разработка оптимального технологического процесса изготовления и метода контроля внеосевого асферического сегмента главного зеркала сверхбольшого европейского телескопа диаметром 39 м

Джумамуратова А.А., *студент*
Россия, 105005, г. Москва, МГТУ им. Н.Э. Баумана,
кафедра «Лазерные и оптико-электронные системы»

Краснова Е.В.*, студент*
Россия, 105005, г. Москва, МГТУ им. Н.Э. Баумана,
кафедра «Лазерные и оптико-электронные системы»

Научные руководители: Денисов Д.Г., к.т.н., доцент
Россия, 105005, г. Москва, МГТУ им. Н.Э. Баумана,
кафедра «Лазерные и оптико-электронные системы»
denisovdg@bmstu.ru

Семенов А.П., к.т.н., доцент,
ведущий инженер ОАО «ЛЗОС»
Россия, 105005, г. Москва, МИРЭА

Патрикеев В.Е., начальник бюро ОАО «ЛЗОС»
Россия, 140080, г. Лыткарино, ОАО «ЛЗОС»

1. Актуальность проекта ESO

В 2004 году совет Европейской Южной Обсерватории (ESO, European Southern Observatory) поставил перед собой грандиозную задачу - «стабилизацию европейского астрономического лидерства и высокого уровня развития в эру экстремально больших телескопов». После этого началась работа над проектом E-ELT – Европейским экстремально большим телескопом (European Extremely Large Telescope). Спустя несколько лет астрономы ESO утвердили проект и приступили к его детальной разработке. Это стало отправной точкой для создания нового поколения телескопов в отличие от нынешнего поколения, в котором самый большой имеет зеркало диаметром 10 метров. Летом 2012 года совет ESO окончательно утвердил проект по созданию E-ELT.

Для строительства E-ELT ESO выбрал гору Армазонес, находящуюся по соседству с пиком Паранал, где расположен комплекс из четырех 8-метровых телескопов VLT (Very

Large Telescope – очень большой телескоп). Это место выбрано неслучайно, так как пустыня Атакама, где находятся оба пика, является одним из самых сейсмоустойчивых и благоприятных мест с точки зрения астроклимата. Планируется, что скоро в Чили будет построен уникальный телескоп внушительных размеров. Внешний вид телескопа показан на рисунке 1. Строительные работы начались в 2013 году и продолжаются в настоящее время. Самой главной частью E-ELT является его 39-метровое зеркало, которое состоит из 798 сегментов с диаметром каждого 1,4 метра. Для компенсации движения атмосферы применяются более шести тысяч приводов, изменяющие форму зеркал телескопа со скоростью тысяча операций в секунду. Зеркала будут изготовлены на предприятиях, расположенных в странах – членах ESO.

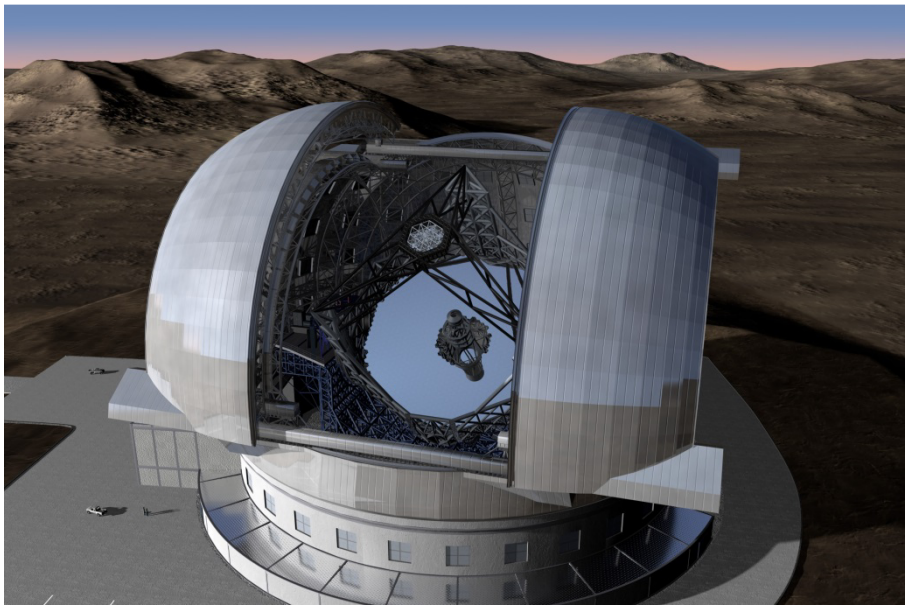


Рис. 1. Сверхбольшой телескоп E-ELT в Чили

Общая стоимость E-ELT составит 1,083 миллиарда евро. E-ELT станет самым большим телескопом в мире, позволяющим вести наблюдения в видимом и в ближнем инфракрасном диапазонах. Ожидаемый срок службы E-ELT -30 лет. Ученые надеются, что с помощью сверхбольшого телескопа им удастся расширить границы исследований космоса, обнаружить новые планеты за пределами Солнечной системы, а также проверить истинность научных гипотез. Первая эксплуатация планируется в 2021-2022 годах. Начиная с октября 2022 года, на телескопе начнутся регулярные наблюдения.

Для обеспечения заданных характеристик E-ELT необходимо, чтобы качество изготовления всех составляющих оптических элементов данного телескопа было

достаточно высоким. При изготовлении таких поверхностей необходимо обеспечить соответствующее качество однородности материала и профиля формы.

2. Качество и сложность изделия

Пространственные параметры профиля оптической поверхности описываются пространственным масштабом неоднородности, т.е. среднеквадратичным отклонением профиля поверхности, или обратной величиной - пространственной частотой. В зависимости от амплитуды на выделенной области различают несколько диапазонов пространственных неоднородностей на оптических поверхностях. На основании международных исследований введена классификация неоднородностей оптических поверхностей в зависимости от величины их пространственного масштаба. Выделяют четыре пространственно-частотных диапазона неоднородностей поверхности, как показано в таблице 1.

Таблица 1

Классификация пространственных неоднородностей

	Диапазон 1		Диапазон 2		Диапазон 3		Диапазон 4
Пространственный масштаб, мм	400–33		33–2,5		2,5–0,12		0,12–0,01
Пространственная частота, $мм^{-1}$	$2,5\times10^{-3}$ – 3×10^{-2}		3×10^{-2} – 0,4		0,4 – 8,3		8,3 – 100
Параметр	PV, длин волн излучения	rms градиент (нм/см)	Rq (rms) (нм)	A ($нм^2 \times мм$)	Rq (rms) (нм)	A ($нм^2 \times мм$)	Rq (rms) (нм)
Стекло	0,33	7	1,8	1,0	1,6	1,0	0,4

Параметры, указанные в таблице 1, характеризуют определенное фазовое искажение волнового фронта и рассеяние на объемных неоднородностях и шероховатостях поверхности. Неоднородности в первом диапазоне характеризуют низкочастотную составляющую профиля, в частности волнистость, расстояние от самой большой впадины на измеряемой поверхности до самого большого бугра (PV) и градиент поверхности (RMS), абсолютные значения которых приведены. Остальные три диапазона определяют среднюю структурную и высокочастотную составляющую ошибку профиля оптической поверхности. Особенности поверхностных показателей качества сегмента данного зеркала оцениваются по четвертому диапазону, суб-нанометровому диапазону шероховатости, и определяются статистическими характеристиками шероховатости поверхности.

3. Технология производства внеосевого асферического сегмента

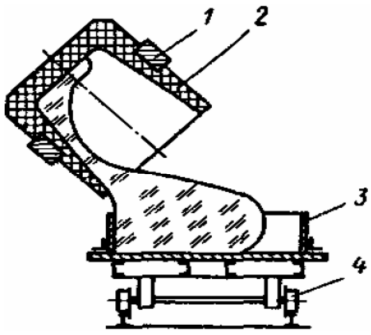
Основная задача при изготовлении прототипа сегмента E-ELT – определить наиболее эффективный и быстрый способ асферизации внеосевой асферической поверхности (АП) заготовки сегмента.

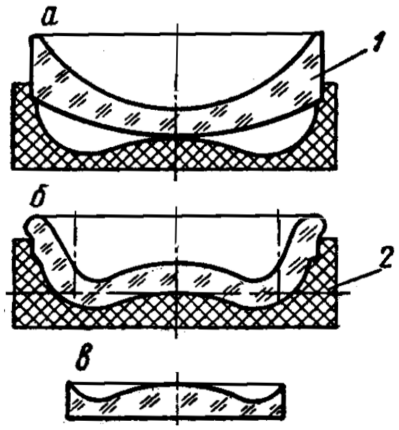
Асферическая оптика может быть грубой, средней и высокой точности. Назначение оптической детали (ОД) предопределяет выбор метода формообразования ее поверхностей.

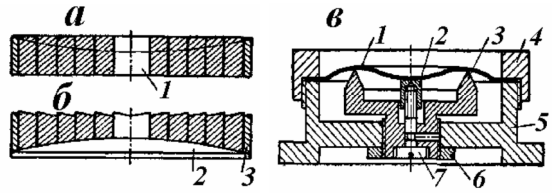
Для формообразования АП применяют различные технологические направления. Остановимся на тех из них, которые в последние десятилетия утвердились на практике.

Таблица 2

Технологические направления, применяющиеся для формообразования асферической поверхности

Метод литья в форму	 Рис. 2. Отливка стекла в форму: 1 – клещи; 2 – горшок; 3 – форма; 4 – тележка	Удовлетворительная точность геометрии только для полимеров. Для стекол - только изготовление исходной заготовки (рис. 1). Литье под давлением позволяет улучшить качество поверхностей и повысить класс чистоты поверхностей.

Метод пластического деформирования исходной заготовки	Моллирование	 Рис. 3. Этапы процесса моллирования: а – исходная заготовка 1 уложена в форму; б – процесс моллирования завершен; в– готовая деталь вырезана из моллированной заготовки по линиям 2	Показатель преломления материала заготовки изменяется на 0,002. Серийное изготовление неответственных, в основном, светотехнических ОД с АП невысокой точности.

	Прессование	 Рис. 4. Пресс-формы для пластического формования оптических деталей: а – исходный набор колец; б – готовая пресс-форма для формования линз Френеля: 1 – заглушка; 2 – шаблон; 3 – центрующее кольцо; в – пресс-форма для формования пластин Шмидта: 1 – упругая пластинка; 2,6 – гайки; 3,4 – кольца; 5 – основание: 7 – винт	Материал для прессования - полимеры. Полученные ОД имеют низкую точность, малую твердость поверхностей, нестабильные геометрические размеры, микротрещины в толще материала («серебро»).

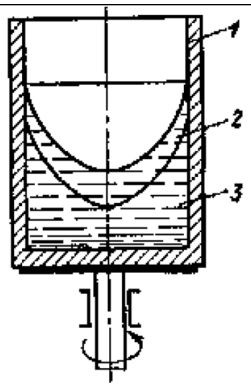
<table>
<tr><td rowspan="1">Метод центробежного формообразования параболоидов</td><td></td><td>

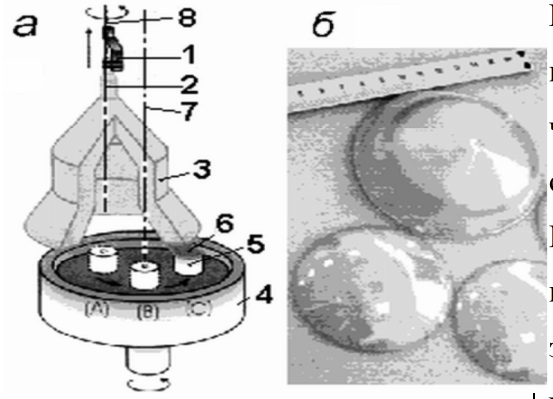
Рис. 5. Устройство для изготовления параболоидов с использованием центробежных сил: 1 – цилиндрический сосуд; 2 – рабочая жидкость;
3 – вспомогательная жидкость</td><td>Невозможность полного устранения вибрации ⇒ шероховатости и макронеровности. Метод ограничен только получением параболоидов.</td></tr>
<tr><td rowspan="2">Метод нанесения материала на исходную заготовку</td><td>Вакуумное напыление</td><td colspan="2">Высокая точность формообразования. Диапозон асферичности ограничен 15-30 мкм, что объясняется сниженим прочности с ростом толщины наносимого материала</td></tr>
<tr><td>Наращивание вещества из раствора (расплава)</td><td>

Рис. 6. Выращивание полых заготовок из расплава лейкосапфира методом локального динамического формообразования: а – схема процесса: 1 – поводок; 2 – керн; 3 – оболочка; 4 – сосуд с расплавом; 5 – источники (A, B, C); 6 – струя расплава; 7 – ось вращающегося</td><td>Мало освоен, хотя практически численно не ограничен. Используется для производства заготовок ОД из кристаллических материалов. Обычно этим методом выращивают монолитные були.</td></tr>
</table>

		сосуда; 8 – ось выращиваемой оболочки; б – вверху – заготовка, внизу – три отполированные ОД	
Методы съема материала с исходной заготовки	Химическое травление	При изготовлении киноформ.	
	Гальванопластика	Гальванопластикой можно изготавливать зеркала и другие оптические элементы диаметром до 3 м и более. Точность изготовления зависит от точности матрицы — негативной копии будущего изделия, выполненной из металла или стекла. Гальванопластикой изготавливают формы для прессования линз Френеля и растров из полимеров, для чего применена технология производства граммофонных пластинок.	
	Ионно-лучевая обработка	Применяется в вакуумных установках. Метод обеспечивает высокую точность формообразования, однако малопроизводителен, используется в основном для доводки АП, а также при изготовлении ДОЭ.	
	Механическая обработка с применением абразивных материалов (наивысшее качество поверхностей по точности и чистоте)	Касание инструмента в точке (малом пятне)	
		Притир по линии	
		Квазисвободный притир поверхностей (каблучный метод, метод с применением маски).	
		Использование упругих свойств материалов инструмента, приспособления, заготовки для получения заданного асферического профиля.	

Обработка внеосевой асферической поверхности оптической детали методом упругой деформации является наиболее производительной, поскольку:

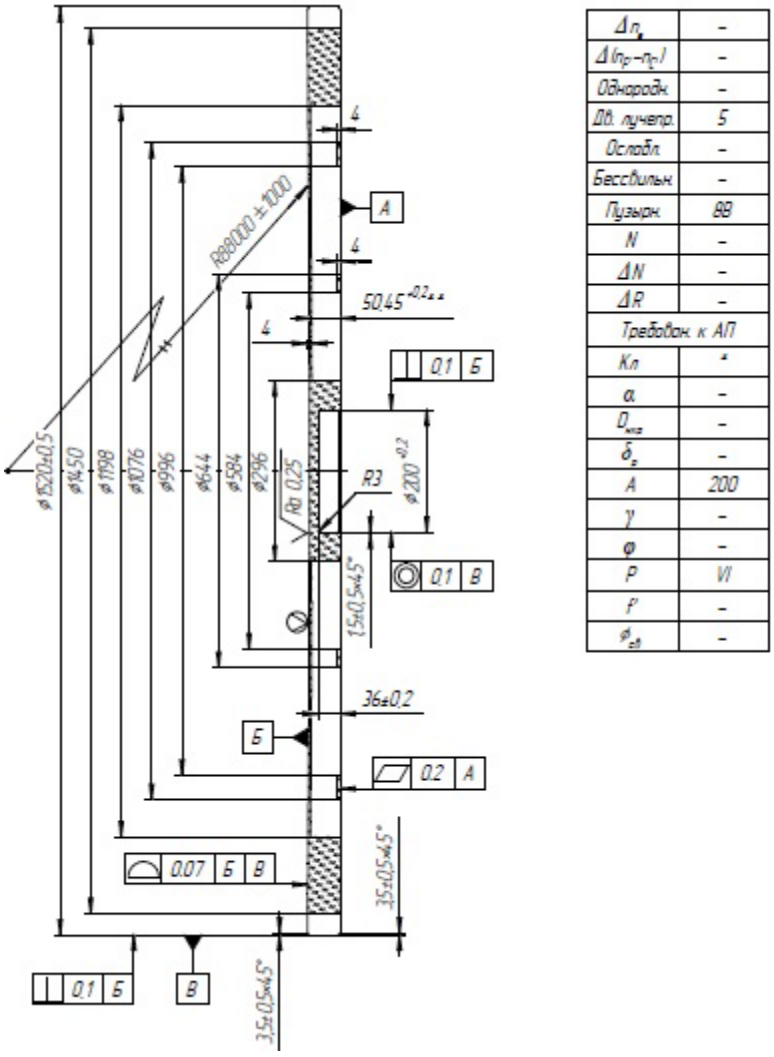
- позволяет использовать полноразмерный инструмент, который обрабатывает сразу всю поверхность;

- поверхность в этом случае будет «гладкой», на ней практически будут отсутствовать мелкоструктурные ошибки от локальной управляемой обработки;

- заготовка должна быть круглой по периметру для использования данного метода и иметь толщину заготовки такой, чтобы можно было выполнить ее деформацию на соответствующую величину;

- приспособления для деформации детали не должны препятствовать процессу формообразования ОД (выступающие элементы, деформации и прогибы во время обработки и т.д.).

Прототип сегмента E-ELT M1 представлен на рисунке 7.



Δn_x	–
$\Delta \lvert n_p - n_{p'} \rvert$	–
Однороднк.	–
Дб. лучепр.	5
Ослабл.	–
Бессбильн.	–
Пузырн.	88
N	–
ΔN	–
ΔR	–
Требован. к АП	
Кл	*
α	–
D_{min}	–
δ_n	–
A	200
γ	–
φ	–
P	VI
P'	–
ϕ_{zb}	–

Рис. 7. Прототип сегмента EELT-M1

Уравнение асферической поверхности описывается следующим выражением:

$$z(x,y) = \frac{\frac{1}{R} \cdot (x^2 + y^2)}{1 + \sqrt{1 - (1+k) \cdot \left(\frac{1}{R}\right)^2 \cdot (x^2 + y^2)}},$$

где $R = 88000$ мм – вершинный радиус кривизны зеркала;

$k = -0{,}993295$ – коническая константа.

Т.к. $-1 < k < 0$, можем сделать вывод, что поверхность представляет из себя эллипсоид вращения вокруг главной оси (эллипсоид или вытянутый сфероид).

Чтобы изготовить требуемую поверхность необходимо изогнуть ее в обратную сторону, отшлифовать сферу и снять деформации. В этом случае будет изготовлена асферика, которую затем надо довести до требований спецификации шлифованием малым инструментом.

Форма круглого внеосевого асферического прототипа сегмента выглядит, как представлено на рисунке 8. Т. е. это карта съема материала, который необходимо удалить с поверхности детали. Та же карта съема, но от ближайшей сферы, представлена на рис. 9.

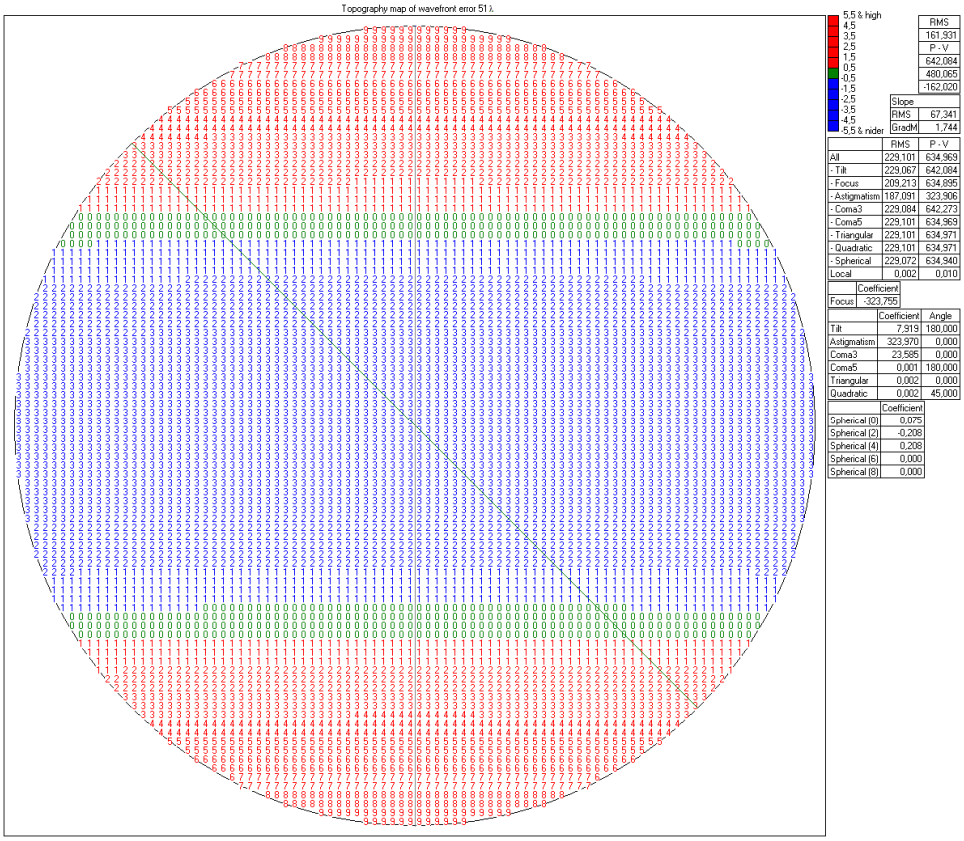


Рис. 8. Карта необходимого съема материала

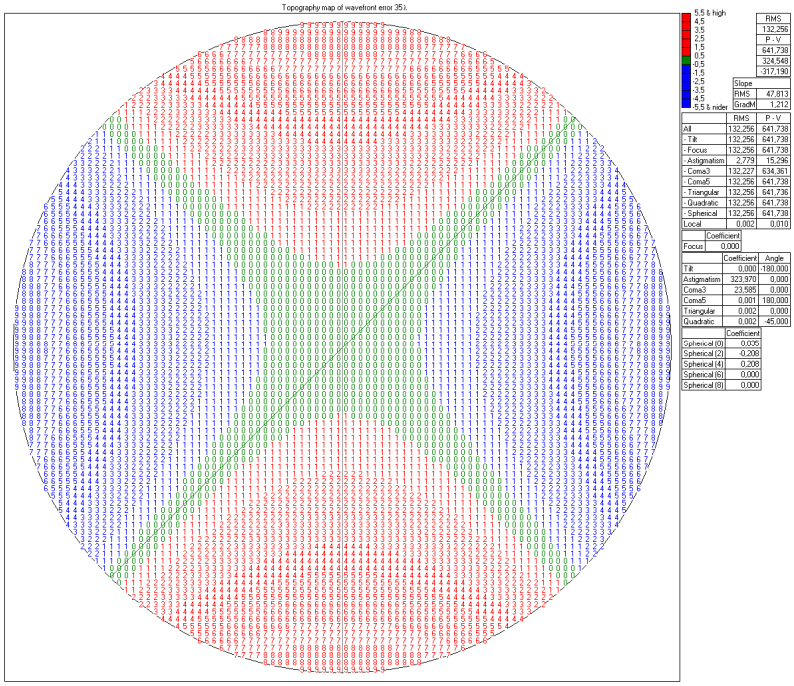


Рис. 9. Карта необходимого съема материала от ближайшей сферической поверхности

На рис. 10 приведена схематическая модель процесса деформации подложки прототипа сегмента и соответствующие механизмы для выполнения данной процедуры.

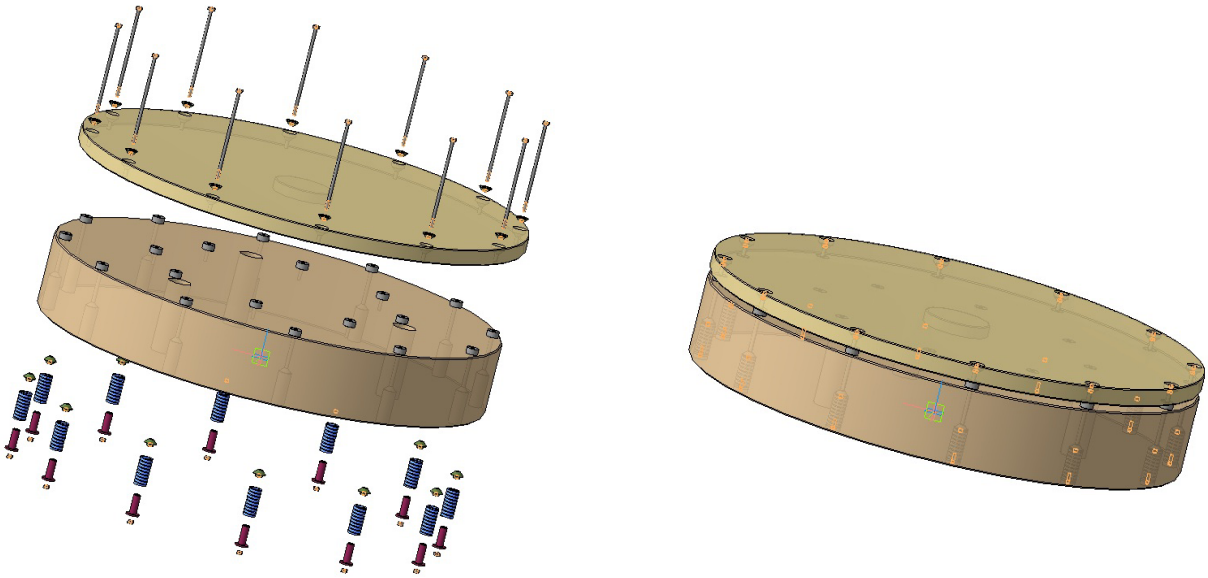


Рис. 10. Принципиальная модель выполнения деформаций заготовки ОД для асферизации методом упругой деформации

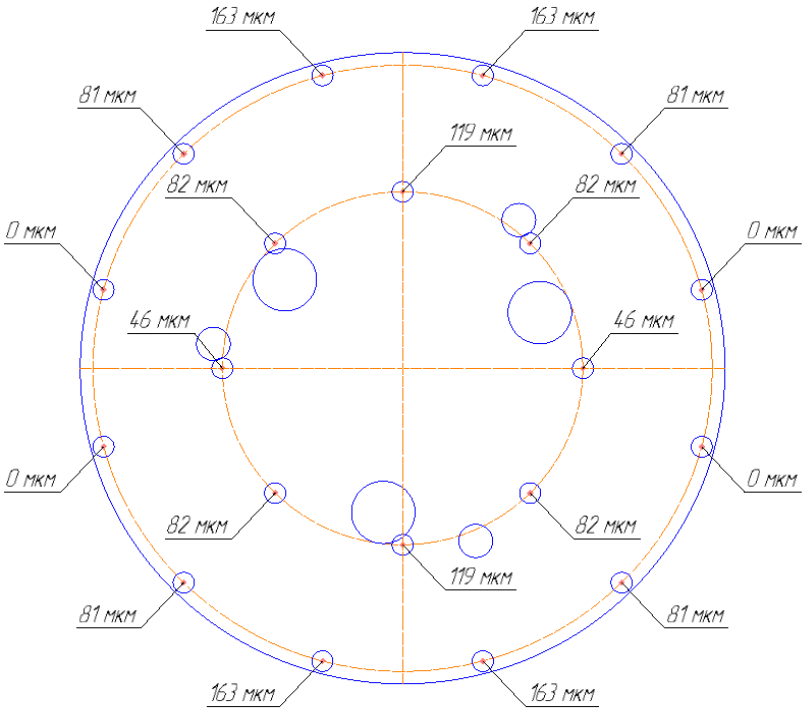


Рис. 11. Разновысотность опор

На рис. 12 приведены расчеты деформаций зеркала на подложке путем оптимизации опорных точек и минимизации отклонений от требуемой формы (рисунок 11). На рис. 13 приведены значения напряжений в данном зеркале при соответствующих деформациях. Напряжения вполне допустимые для заготовок из Астроситалла с соответствующими геометрическими параметрами.

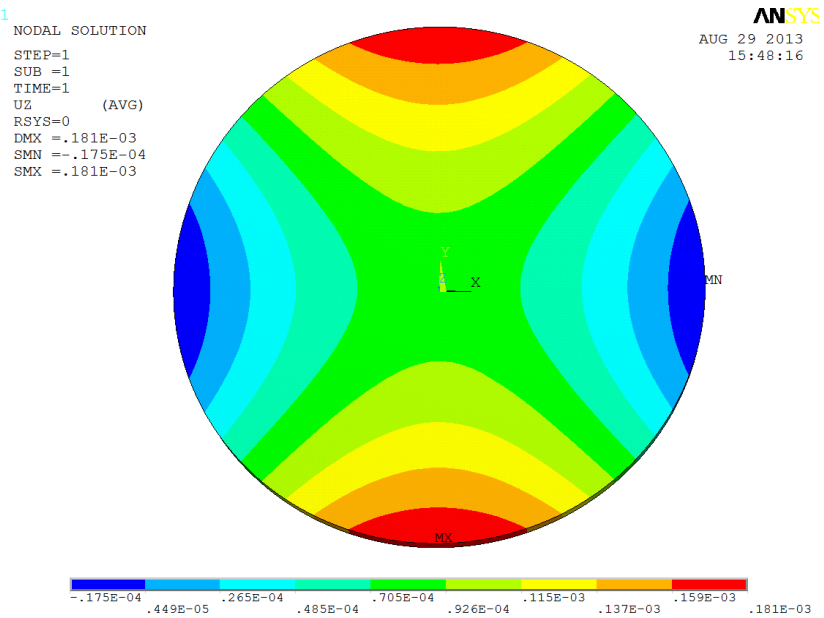


Рис. 12. Деформации зеркала

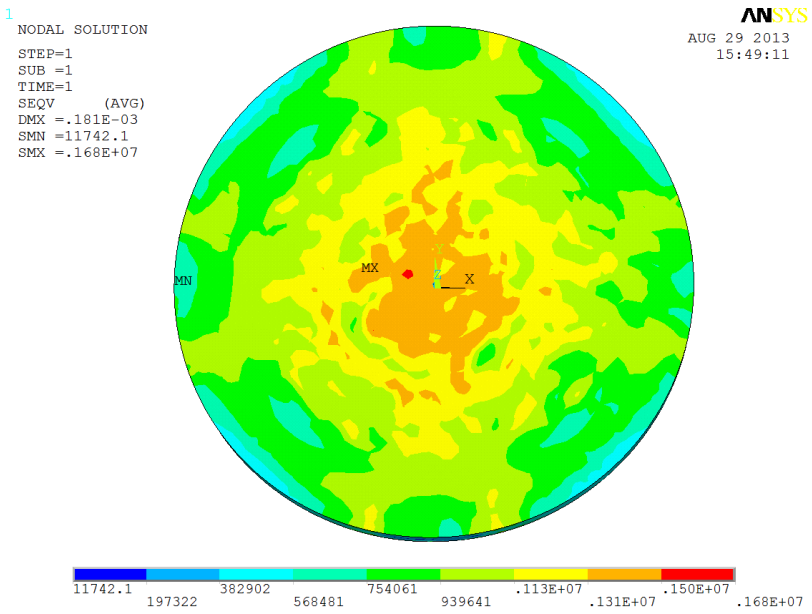


Рис. 13. Внутренние эквивалентные напряжения (до 1,68 МПа в центре)

На рис. 14 приведены деформации зеркала на рассчитанных опорных точках вместе с деформацией подложки. Толщина подложки выбиралась такой, чтобы ее собственные деформации были малы по сравнению с деформацией рабочей детали. На рис. 15 представлен остаточный предполагаемый волновой фронт отклонений формы поверхности детали от теоретической, после снятия напряжений.

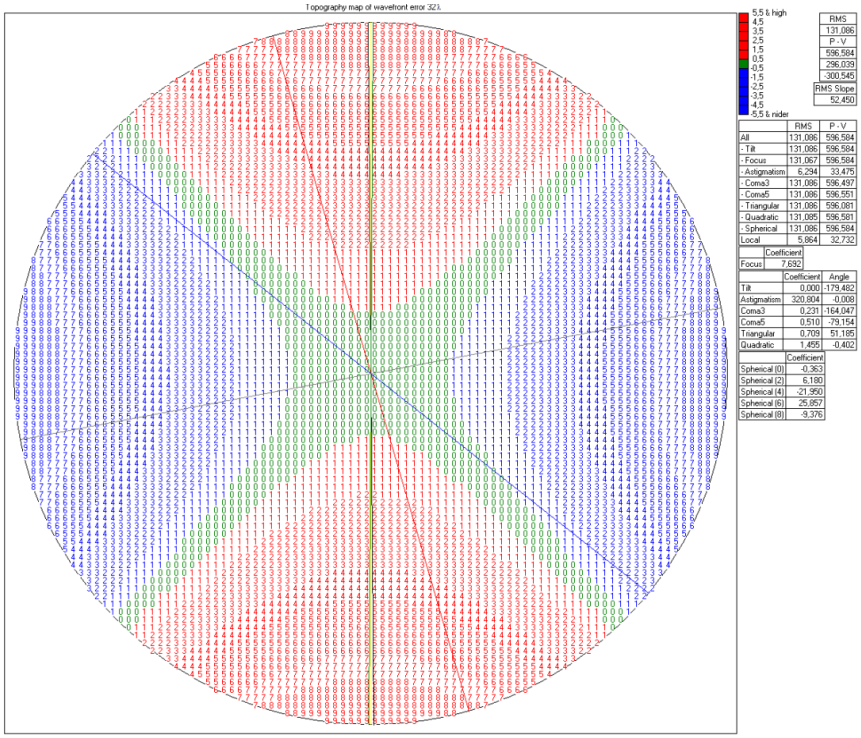


Рис. 14. Деформации зеркала вместе с подложкой на опорных точках (рис. 10)

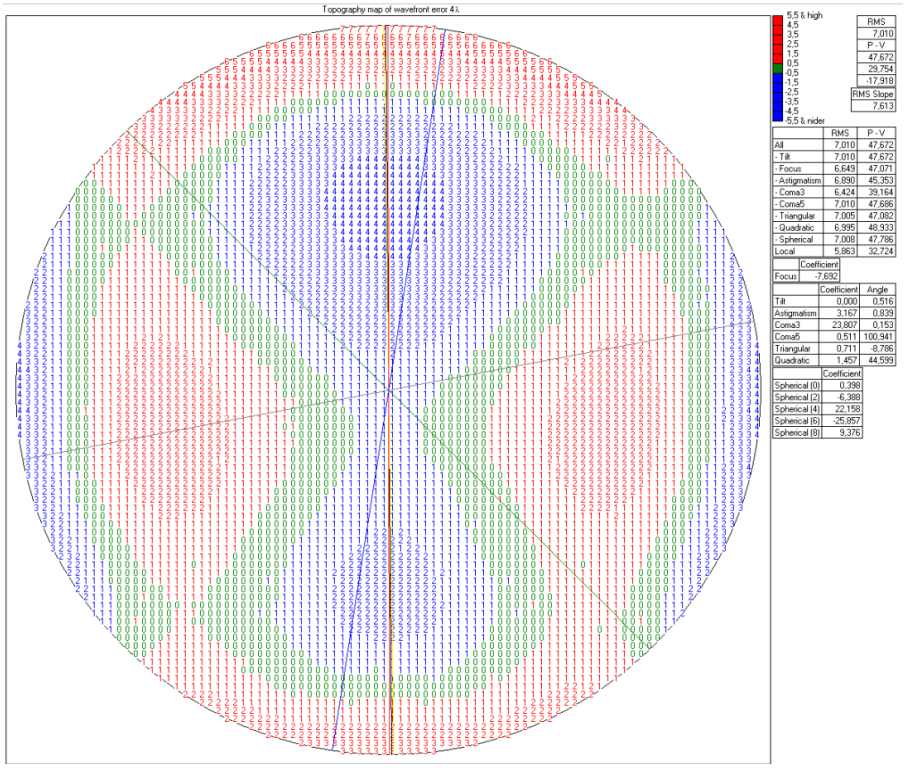


Рис. 15. Остаточный предполагаемый волновой фронт отклонений формы поверхности детали от теоретической после снятия напряжений

4. Разработка интерференционного метода и аппаратуры контроля статистических высотных характеристик

Ранее была приведена классификация (таблица 1), в которой IVдиапазон характеризует статистические параметры шероховатости поверхности. Для диагностики этих параметров предлагается функциональная схема поляризационного фазосдвигового интерферометра Линника и метод динамической интерферометрии.

Рассмотрим кратко принцип работы и состав аппаратуры функциональной схемы прибора контроля, в качестве которого используется функциональная схема поляризационного фазосдвигового интерферометра Линника компании 4D Technology.

Особенностью данного прибора является высокоскоростной съем «ансамбля» интерферограмм за один кадр, что позволяет минимизировать цеховые вибрации.

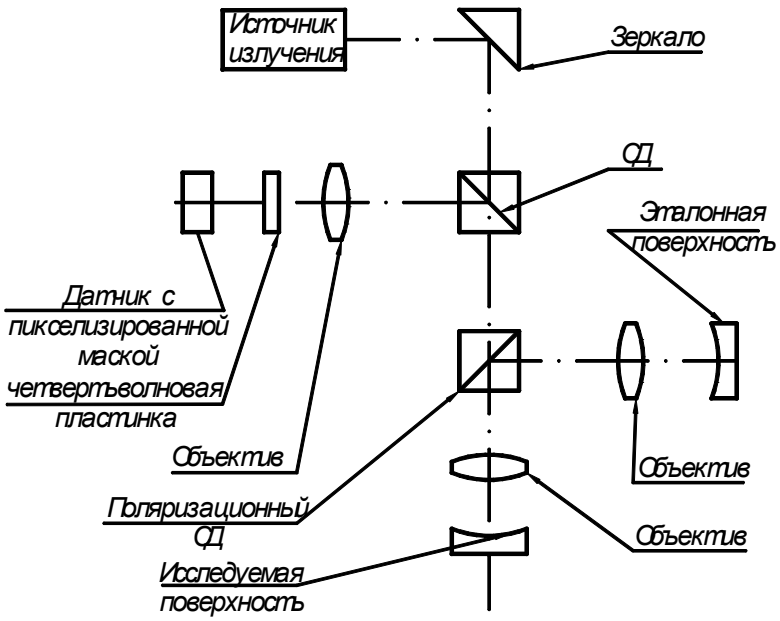


Рис. 16. Функциональная схема динамического интерферометра

Источник излучения с перестраиваемой поляризацией на выходе, направляет излучение в микроинтерферометр. Излучение попадает в светоделитель с соотношением $\rho/\tau = 50\%/50\%$, затем оно проходит через поляризационный светоделитель, который направляет в ветвь с исследуемым объектом s-поляризованное излучение, а в ветвь с опорной поверхностью – p-поляризованное. Опорное зеркало представляет собой высококачественную зеркальную поверхность с коэффициентом отражения $\rho = 25\%$.

Излучение, отразившись от опорного и объектного зеркал, возвращается и пройдя поляризационный светоделитель выходят из микроинтерферометра Линника. Оба пучка отражаются от второго светоделителя и проходят проекционный объектив регистрирующей ветви.

Перед приемником излучения располагается четвертьволновая пластинка, меняющая p-поляризованное излучение на излучение с правой круговой поляризацией, а s-поляризованное изучение – с левой круговой поляризацией. Затем оба пучка проходят через поляризационную маску, формирующую интерференционную картину на детекторе.

Устройство поляризационной маски показано на рисунке 17. Каждая ячейка маски состоит из 4 подъячеек с фазовыми сдвигами друг относительно друга на 90 градусов (возможны и другие комбинации, но ячейка с четырьмя фазовыми сдвигами более оптимальна). Для наилучшего разрешения, каждой подъячейке соответствует один пиксель ПЗС матрицы.

Принцип регистрации фаз заключается в том, что поляризационный интерферометр генерирует опорный и объектный волновые фронты с ортогональным типом поляризации по отношению друг к другу. Пикселизированная поляризационная маска производит сдвиг обоих волновых фронтов в каждом пикселе, получая, таким образом, 4 различных интерференционных картины за одно измерение.

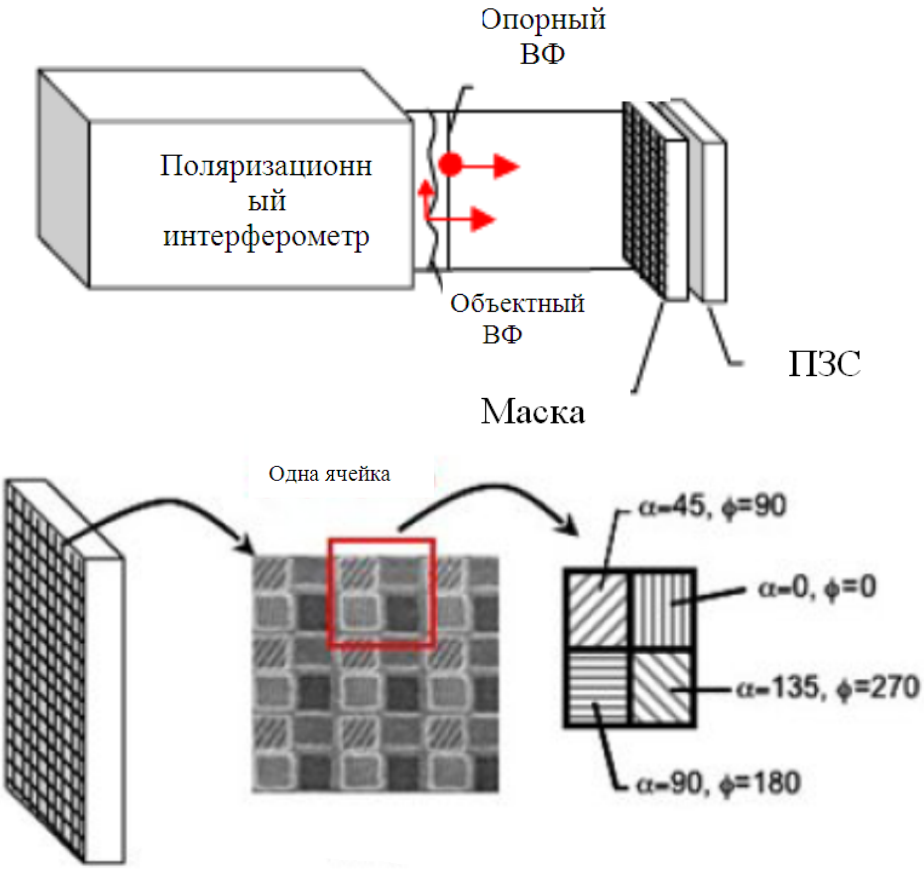


Рис. 17. Пикселизированная поляризационная маска

Подобная поляризационная маска может быть спроектирована как двулучепреломляющая пластинка, но ее производство сложно, поэтому вместо нее можно использовать массив микрополяризаторов. Интенсивность пучков (рисунок 18), которые проинтерферировали после поляризационной маски, можно записать как:

$$I(x,y) = \frac{1}{2} \cdot (I_r + I_s + 2 \cdot \sqrt{I_r \cdot I_s} \cdot \cos(\Delta\varphi(x,y) + 2 \cdot \alpha_p),$$

где α_p - угол поляризации в плоскости XOY. Таким образом, из этого соотношения видно, что поляризатор ориентированный на сдвиг в 0 градусов делает возможным интерференцию синфазных (т.е. 0˚) опорного и объектного волновых фронтов. А

поляризатор ориентированный на сдвиг в 45˚ делает возможным интерференцию синфазных (т.е. 90˚) опорного и объектного волновых фронтов и т.д.

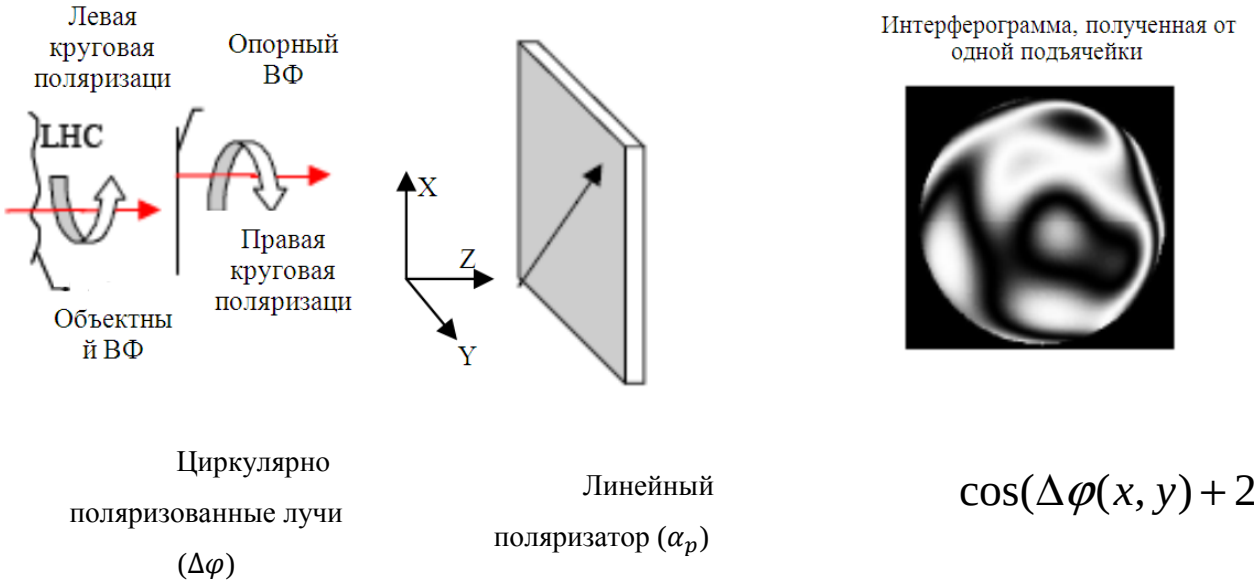


Рис. 18. Принцип работы пикселизированного фазосдвигающего интерферометра

Для вычисления фазы используется следующий алгоритм фазосдвигающей интерферометрии. Интенсивность каждой сдвинутой по фазе интерферограммы на активной части детектора:

$$A(x,y)=\frac{1}{2}\cdot\left[I_r+I_s+2\cdot\sqrt{I_r\cdot I_s}\cdot\cos\left(\Delta\varphi(x,y)\right)\right]$$

$$B(x,y)=\frac{1}{2}\cdot\left[I_r+I_s+2\cdot\sqrt{I_r\cdot I_s}\cdot\cos\left(\Delta\varphi(x,y)+\frac{\pi}{2}\right)\right]$$

$$C(x,y)=\frac{1}{2}\cdot\left[I_r+I_s+2\cdot\sqrt{I_r\cdot I_s}\cdot\cos(\Delta\varphi(x,y)+\pi)\right]$$

$$D(x,y)=\frac{1}{2}\cdot\left[I_r+I_s+2\cdot\sqrt{I_r\cdot I_s}\cdot\cos\left(\Delta\varphi(x,y)+\frac{3\cdot\pi}{2}\right)\right],$$

где I_r, I_s - интенсивности опорного и объектного волновых фронтов. Фаза может быть вычислена с помощью следующего выражения:

$$\Phi(x,y)=arctg\left(\frac{I_3(x,y)-I_1(x,y)}{I_2(x,y)-I_0(x,y)}\right)$$

При помощи данного выражения фазы можно вычислить шероховатость исследуемой поверхности по формуле:

$$R(x,y) = \frac{\lambda^2}{4\pi} \cdot tg^{-1}\left(\frac{X(x,y)}{Y(x,y)}\right)$$

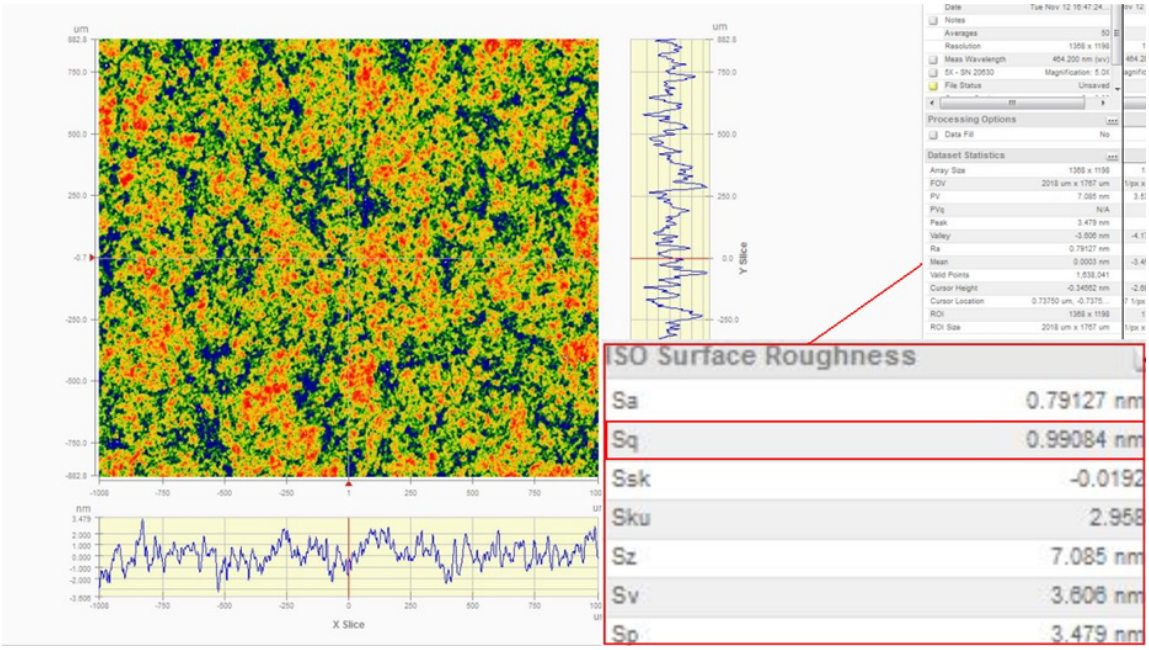


Рис. 19. Экспериментальные данные измерения с помощью прибора NanoCamSq

Конструктивно данный прибор представляет из себя базовый корпус, к которому крепится сменный модуль объектива (рисунок 20). Внешний вид прибора представлен на рисунках 20. Конструктивное исполнение и технический облик прибора представлен на рисунках 21, 22.



Рис. 20. Внешний вид прибора NanoCamSq

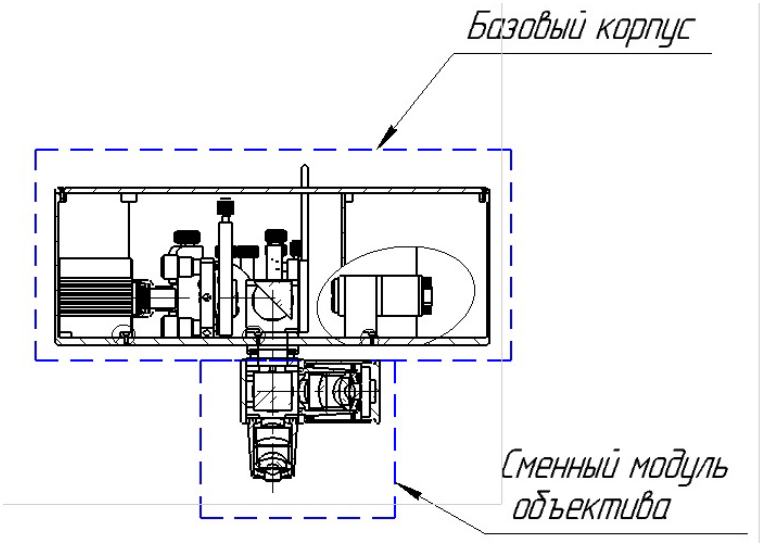


Рис. 21. Сборочный чертеж прибора NanoCamSq

Базовый корпус сконструирован в соответствии с горизонтальной архитектурой компоновки (рис. 22) – приемно-передающий канал: камера с волновой пластинкой и блендой в сборе (2), призма-зеркало в сборе (3), светоделительный кубик в сборе (4), линза в сборе (5), зеркало в сборе (6), поляризатор в сборе, осветительный канал в сборе (смотри приложение 2).

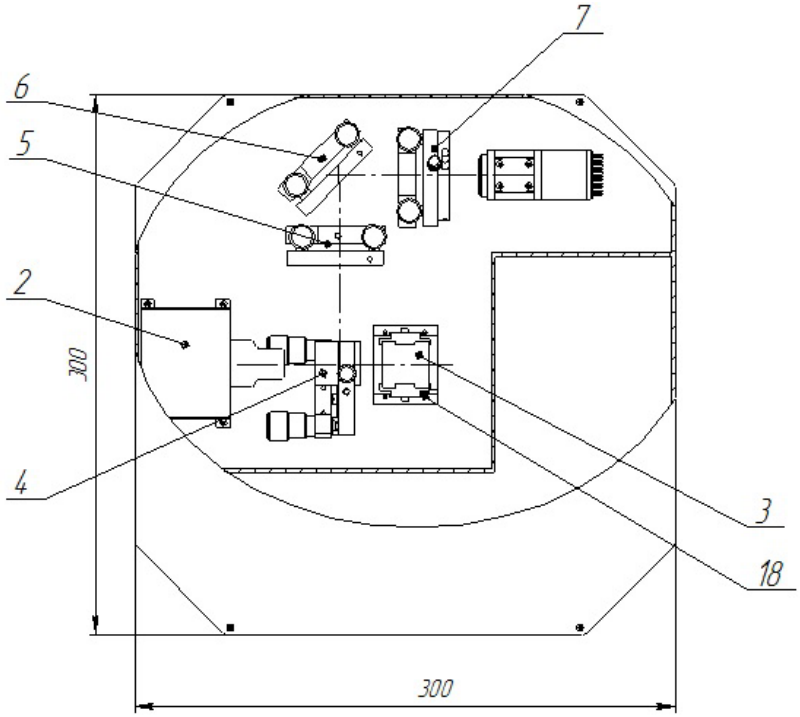


Рис. 22. Сборочный чертеж прибора NanoCamSq. Вид сверху

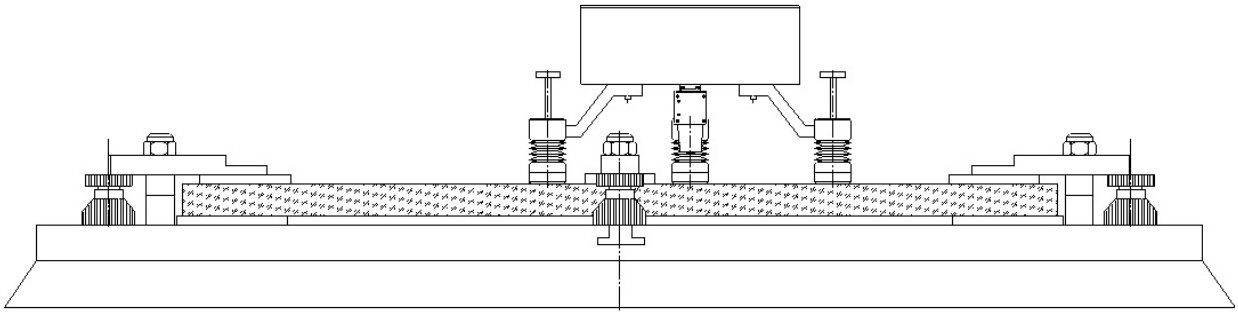


Рис. 23. Прибор NanoCamSq и контролируемая деталь

Список литературы

[1]. Заказнов Н.П., Горелик В.В. Изготовление асферической оптики. М.: Машиностроение, 1978. 248 с.

[2]. Abdulkadyrov M.A., Patrikeev A.P., Belousov S.P., Semenov A.P., Patrikeev V.E., Ignatov A.N., Polyanchikov A.V., Pridnya V.V., Sharov Y.A., Poleshchuk A.G., Nasyrov R.K., M1 primary mirror manufacturing for VISTA project // Proceedings of SPIE, 7018. 2008. P. 125.

[3]. Официальный сайт АО «ЛЗОС». Режим доступа: http://lzos.ru/content/view/305/104/ (дата обращения 26.01.2016).

[4]. Brad Kimbrough, Neal Brock, James Millerd. Dynamic surface roughness profiler. Available at: http://www.4dtechnology.com/reflib/Dynamic%20Surface%20Roughness%20Profiler.pdf, accessed 12.05.2016.