

Самодельный интерферометр Баса (Bath interferometer)

Юрий Кузнецов

Денис Саква

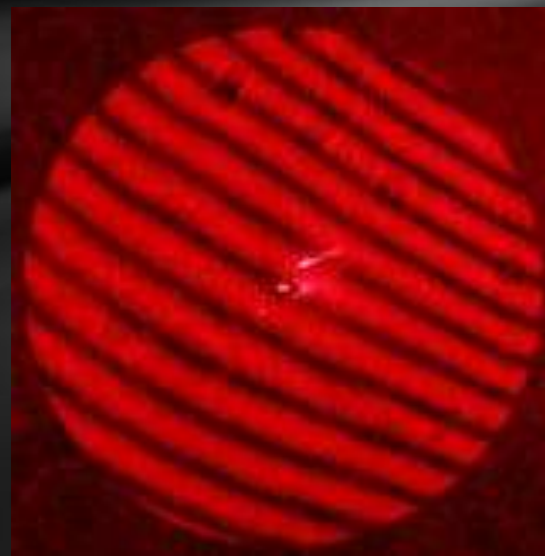
Сергей Дорофеев

Что такое интерферометр?

Интерферометр – это измерительный прибор, в котором пучок света разделяется на два когерентных пучка, которые проходят разные оптические пути, собираются обратно в один пучок, интерферируя друг с другом. По внешнему виду интерференционной картины можно судить о том, на сколько фазы пучков были смещены друг относительно друга.



Интерферометр



Тоже интерферометр

Почему интерферометр?

- Количественная оценка. Интерферометр позволяет получить количественную (в отличие от методов Фуко и Ронки) оценку оптической поверхности или детали и убрать элемент гадания из процесса тестирования*
- Высокая точность оценки. Можно оценить (не увидеть, а именно оценить) ошибки, размах которых оценивается в долях длины волны света
- Чувствительность интерферометра не зависит от относительного отверстия тестируемого зеркала, в отличие от метода Фуко, который лучше показывает ошибку на зеркале с большим относительным отверстием.

* Теоретически, при выполнении всех условий ☺

Почему не использовали раньше?

- Профессиональные коммерческие интерферометры (Zygo) выглядят красиво, работают безупречно, но стоят очень дорого. Мы говорим о цифрах с 4-5 нулями. В ДОЛЛАРАХ!
- Полупрофессиональные (полулюбительские) интерферометры стоят тоже недешево. Самый популярный (и, наверное, единственный) в этой категории интерферометр – это интерферометр Сераволо
<http://www.ceravolo.com/Interferometry.html> .
Компоненты для него потянут на 500-600 долларов.

Чем Бас лучше/хуже?

Положительные стороны

- Не требует когерентного стабильного источника света. Лазерная указка и даже светодиод вполне подходят
- Не требует высокой точности компонент, отсюда и невысокая стоимость. Светоделительный кубик+линза+зеркальце+лазер можно купить за 15-40 долларов
- Малочувствителен к вибрациям (по сравнению с некоторыми другими интерферометрами)

Недостатки

- Разнесенные опорный и тестовый лучи вносят астигматизм (небольшой)

Что нужно для постройки?

1. Лазерный диод
2. Светоделительный кубик 10-15мм
3. Двояковыпуклая линза с фокусным расстоянием 5-10мм и диаметром 5-7мм
4. Плоское зеркало около 10мм
5. Трехкоординатная подвижка (вправо-влево, вперед-назад, вверх-вниз)

Лазерный диод (\$1-5)

- Лазер подойдет практически любой. Красный, зеленый, мощность тоже не важна.
- Если выбирать между красным и зеленым лазерами, то мне лично больше понравился красный, работающий в режиме пониженного напряжения. В этом режиме лазерный диод излучает монохроматичный, но не когерентный свет (как обычный диод) и это позволяет сгладить диффракционные эффекты на пылинках на оптике и прочих дефектах.
- В огромном количестве лазеры продаются на ebay и DealExtreme ([dx.com/s/laser+module](https://www.dealxtreme.com/s/laser+module))



Светоделительный кубик (\$15-20)

С кубиками все просто*. Чем больше кубик – тем меньше виньетирование, но тем ближе надо поместить камеру к кубику, чтобы сфотографировать интерферограмму.

15мм считается более универсальным, но 10мм мне лично больше понравился.

15 мм <http://www.surplushed.com/pages/item/l2046d.html>

10 мм <http://www.surplushed.com/pages/item/l10563d.html>

* Никогда ничего просто не бывает ☺



Линза (\$2-5)

- Двояковыпуклые, плосковыпуклые линзы с фокусным расстоянием 7-10мм и диаметром 5-7мм.
- Чем меньше фокусное расстояние линзы – тем легче осветить “быстрое” зеркало.
- Линзы с фокусом около 7мм хватит на зеркала где-то до F/4.
- С диаметром тоже есть вопросы. Для того, чтобы интерферометр вносил меньше астигматизм нужно разводить пучки на как можно меньшее расстояние, т.е. брать маленькую линзу. Но обычно у линз края более низкого качества, а по центру качество близкое к идеальному, т.е. имеет смысл взять линзу побольше.
- Как выход – можно взять линзу диаметром побольше (скажем 10мм) и сточить один край по хорде. Линзу лучше брать просветленную, так как это уменьшает паразитные блики в системе, которых будет много.

Линза (продолжение)

Легче всего подобрать подходящую линзу на том же www.surplussed.com в разделе Lens Finder (Поиск линз)

<http://www.surplussed.com/lens.cfm>

Выбираем тип Biconvex/Plano convex

Diameter 6 to 10mm

Focal Length 6 to 10mm

Нажимаем Find Lenses и выбираем из вывалившегося списка подходящую линзу.

Приставка PL означает серию Precision (повышенной точности)

Смотрим, чтобы была Coated (просветлена), но это не обязательно. Например:

<http://www.surplussed.com/pages/item/pl1098.html>



Плоское зеркало

Плоское зеркало

http://www.surplushed.com/pages/category/preopticsflats_1.html

Например вот это

<http://www.surplushed.com/pages/item/pm1117.html>

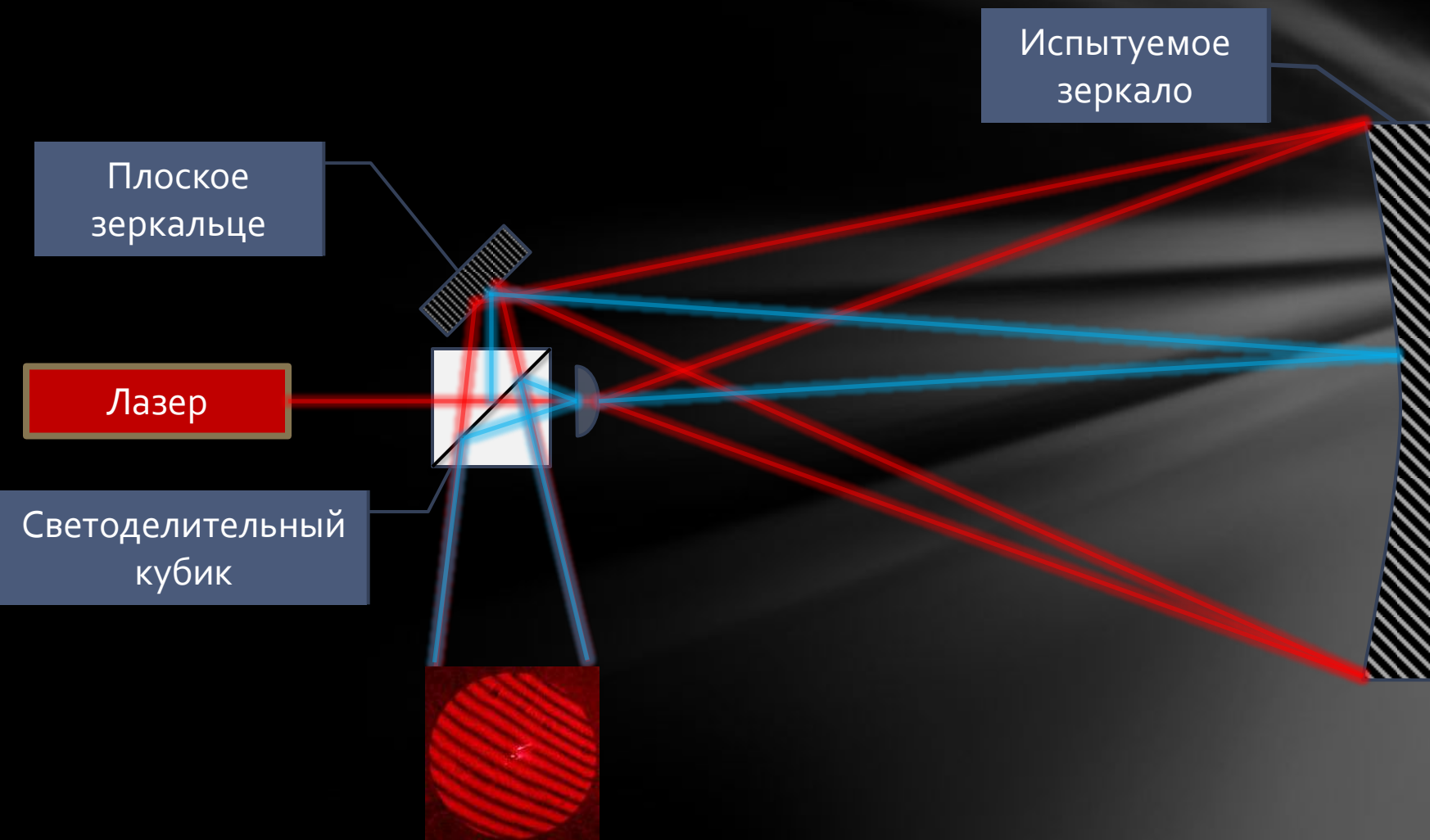


Трехкоординатная подвижка (Самое сложное)

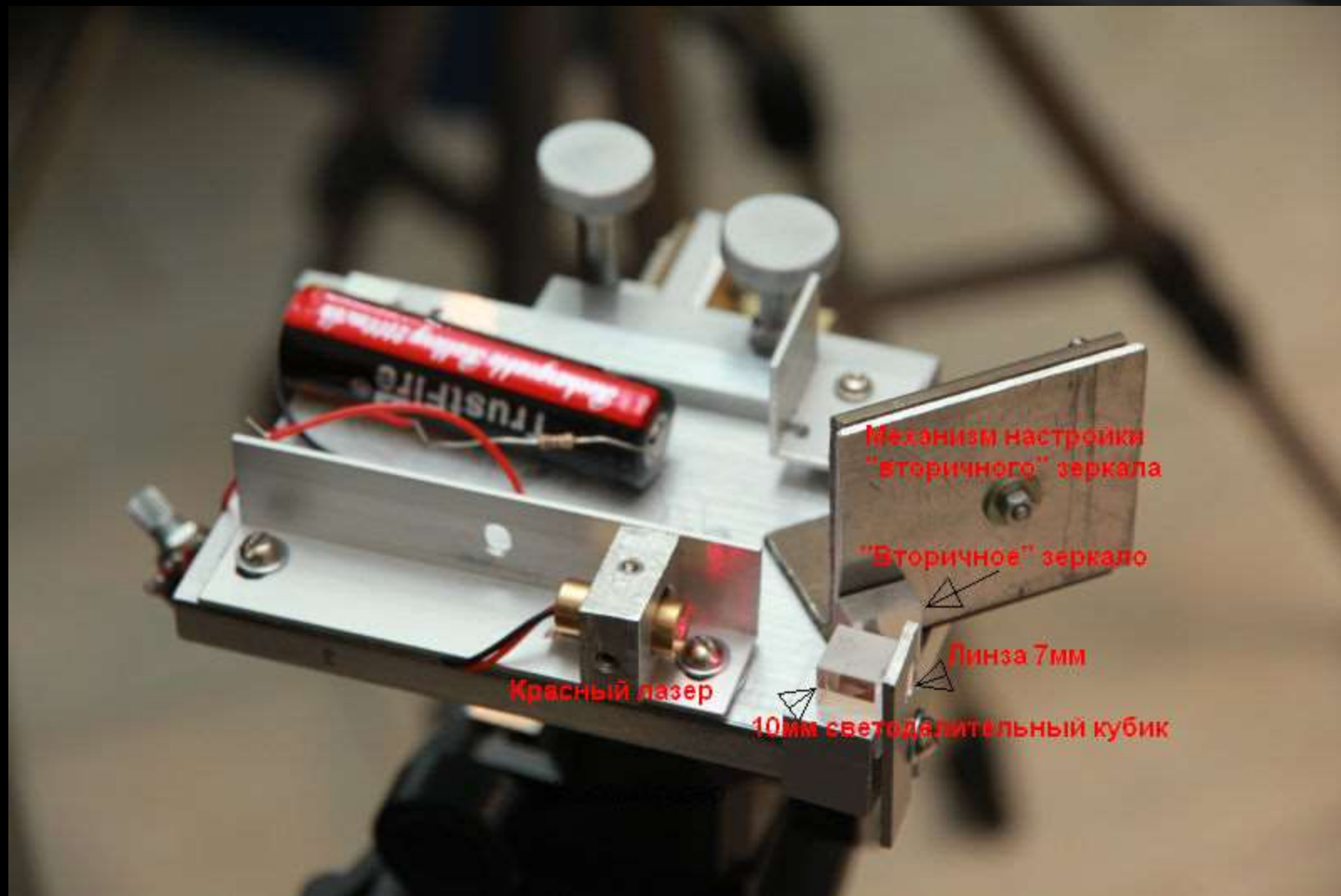
Как минимум должна обеспечивать:

- Плавное движение к зеркалу и обратно (фокусировка)
- Вправо-влево
- Вверх-вниз
- Удобно использовать двухкоординатный столик от микроскопа на фото-штативе

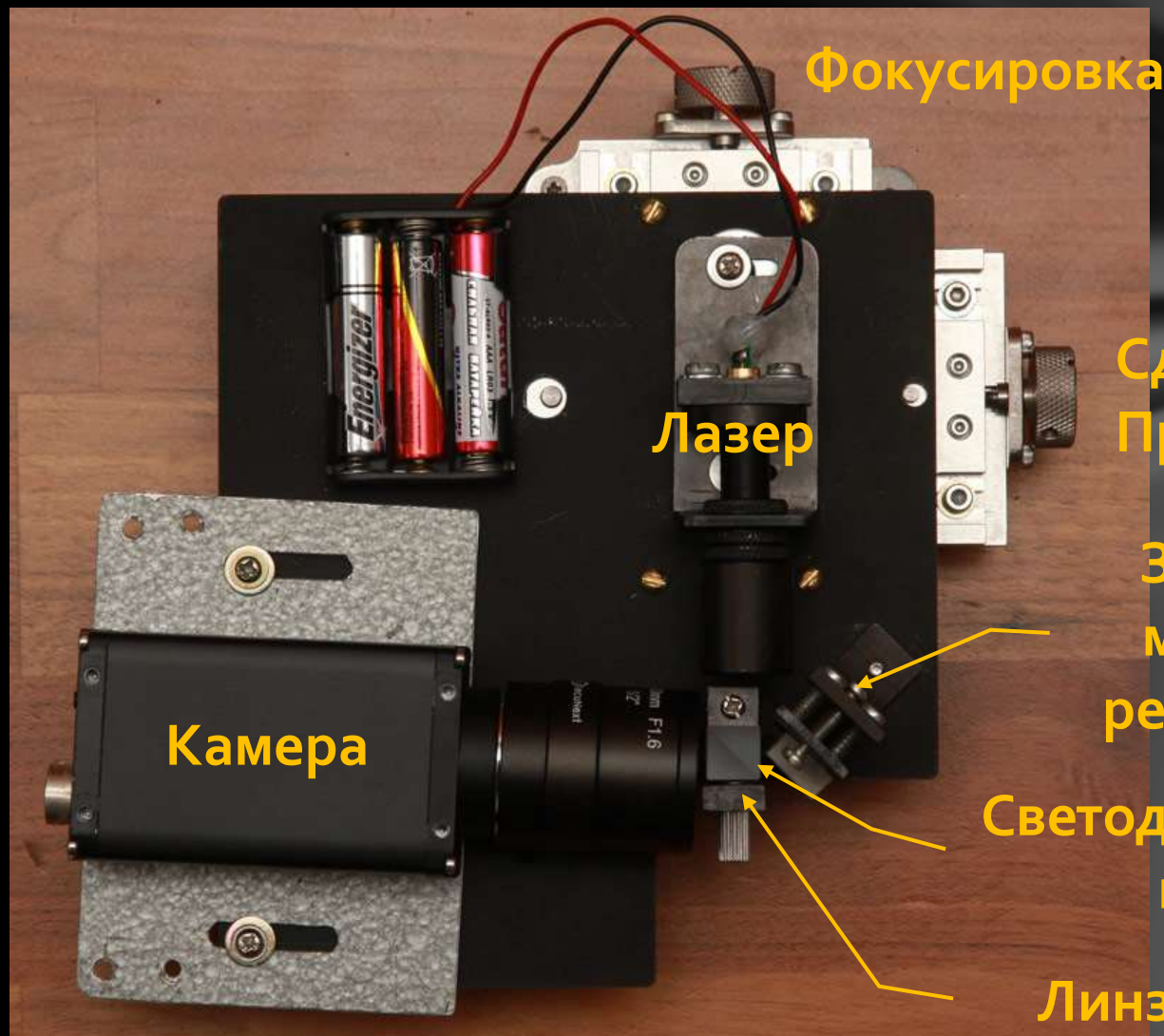
Схема работы интерферометра



Интерферометр. Версия 1



Интерферометр. Версия 2



Фокусировка

Лазер

Сдвиг
Право-лево

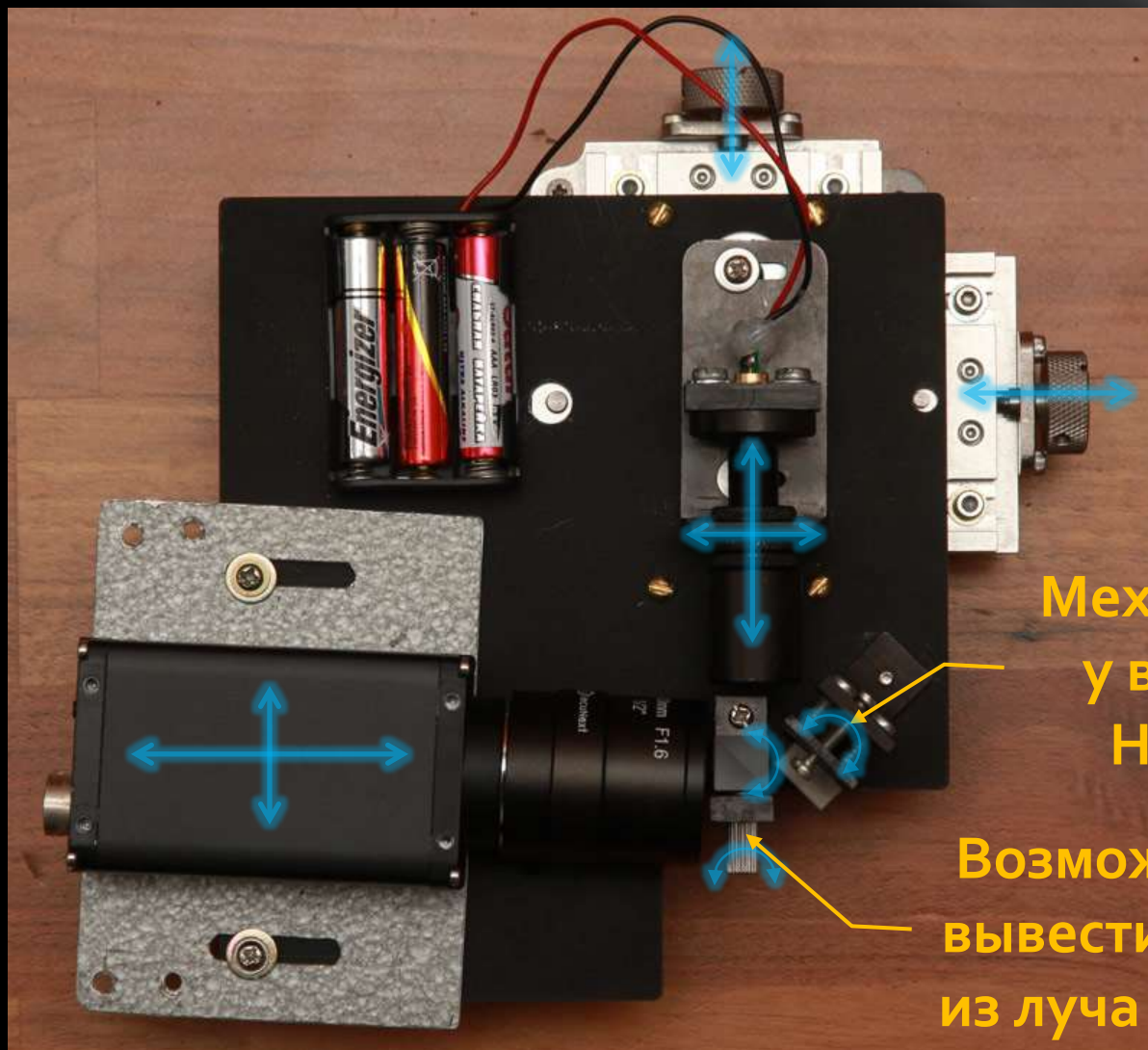
Зеркало и
механизм
регуливовки

Светоделительный
кубик

Линза в оправе

Камера

Интерферометр. Версия 2



Механизм как
у вторички
Ньютона

Возможность
вывести линзу
из луча лазера

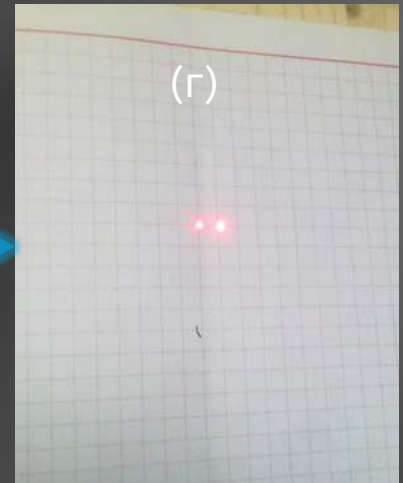
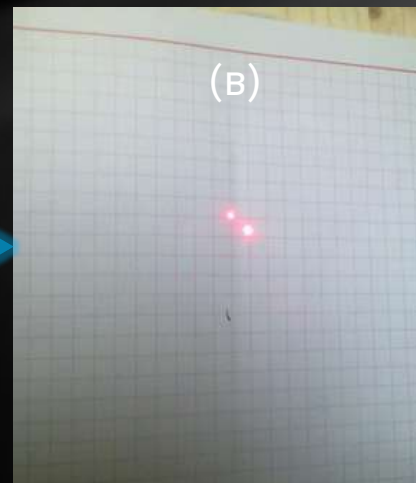
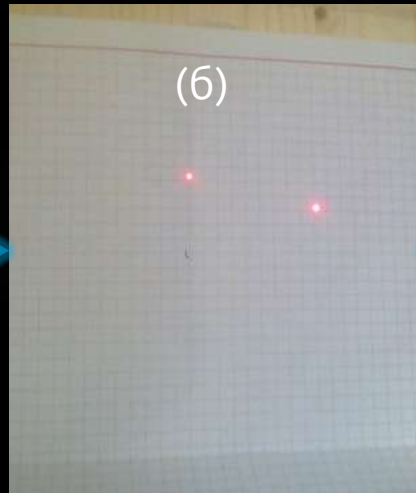
Интерферометр. Версия 2



Настройка интерферометра

1. Проверяем параллельность опорного и рабочего пучков

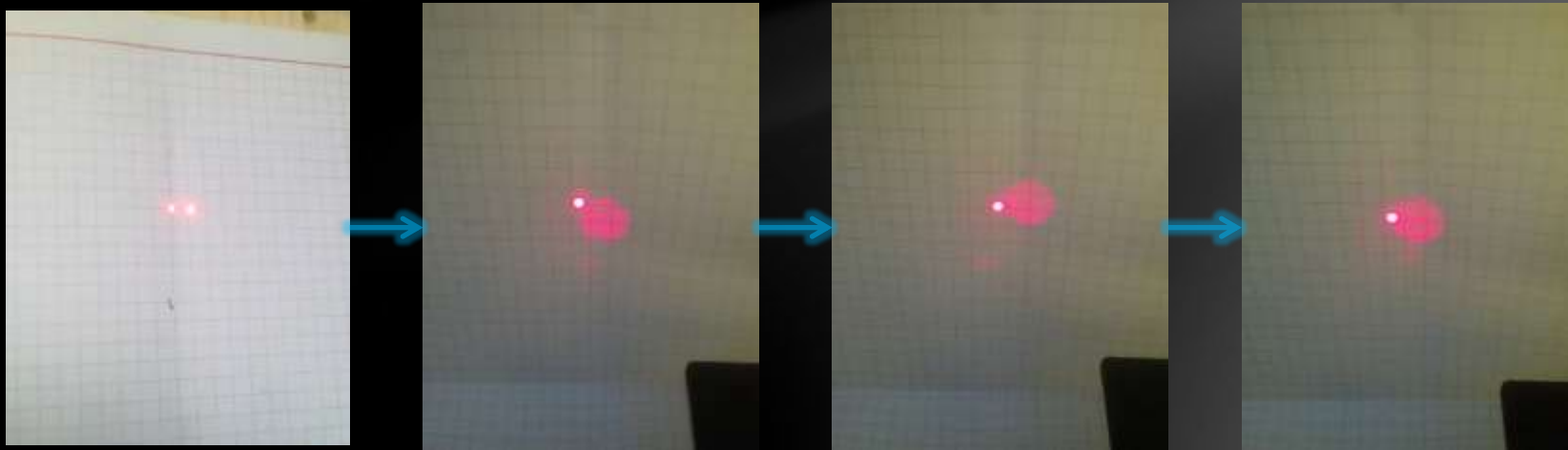
- Выводим линзу из лазерного луча
- (а) Измеряем расстояние между двумя лучами на выходе из интерферометра
- (б) Измеряем расстояние между лучами на расстоянии 3-5 метров
- (в) и (г) Изменяя заклон зеркала добиваемся параллельности пучков



Настройка интерферометра (продолжение)

Вводим линзу в луч лазера так, чтобы луч проходил через центр

Центр расходящегося луча должен совпадать с тем местом, куда раньше попадал луч до установки линзы



Настройка интерферометра (продолжение)

2. Настраиваем интерферометр для получения интерференционной картины (грубая настройка)

- Направляем опорный луч в район около центра испытуемого зеркала
- С помощью листа белой бумаги находим куда луч отражается и, управляя наклоном испытуемого зеркала и интерферометра, «загоняем» отраженный луч в линзу. При этом луч, прошедший через линзу и отраженный от испытуемого зеркала, попадет на маленькое зеркальце

Словили «зайчик»
от зеркала



Ближе к фокусу



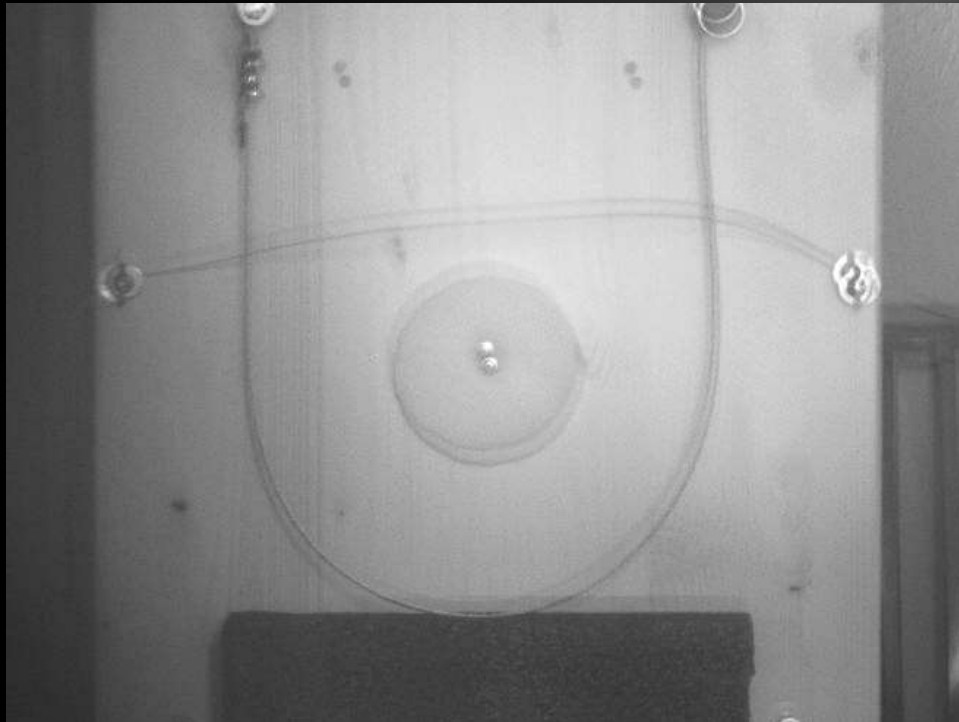
Загоняем отраженные
лучи обратно



Настройка интерферометра (продолжение)

3. Фокусируем камеру на зеркало

- Для фотографирования интерференционной картины камера должна быть сфокусирована на тестируемом зеркале (оно хорошо видно через светоделительный кубик при дневном свете).
- Для фокусировки выключаем лазер



Настройка интерферометра (продолжение)

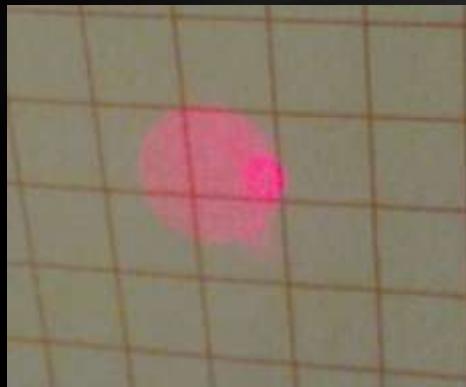
4. Настраиваем интерферометр для получения интерференционной картины (тонкая настройка)

- Теперь смотрим на картинку, которая получается на выходе из интерферометра. Можно спроецировать изображение на лист белой бумаги. Если лучи попали в линзу и зеркало, как было описано на предыдущем слайде, то мы увидим два круга. Для получения интерференционной картины эти круги нужно совместить.

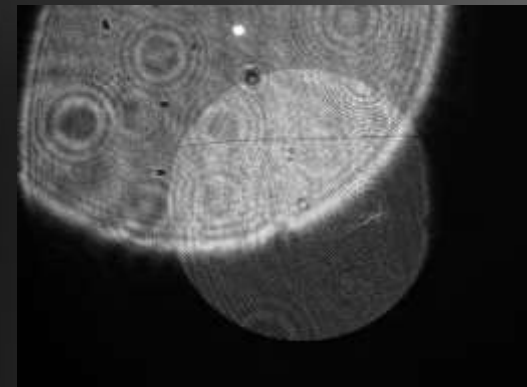
Лучи слишком далеко
друг от друга



Уже лучше



Вид через камеру



Настройка интерферометра (продолжение)

5. Настраиваем интерферометр для получения интерференционной картины (тонкая настройка)

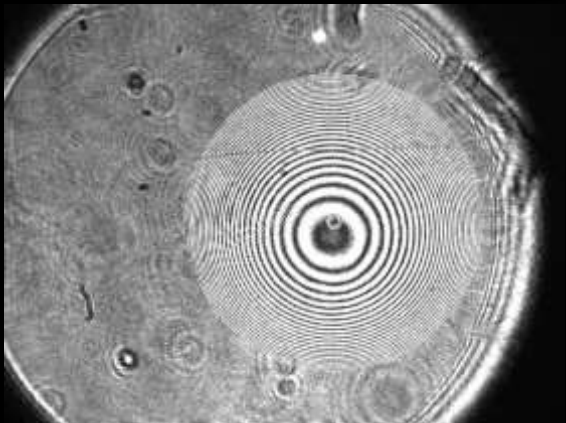
- Совмещение двух кругов на предыдущем шаге сразу даст интерференционную картину
- Если интерференционная картина не видна, то:
 - Вы слишком далеко от фокуса и интерференционные полосы очень близки друг к другу. Сфокусируйтесь более точно.
 - Вибрация. Интерферометр очень чувствителен к вибрациям и они могут смазывать полосы.
 - Низкий контраст полос. Опорный и тестовый лучи имеют разную интенсивность. Надо покрутить лазер вокруг оси, пока интенсивность лучей не выровняется.

Настройка интерферометра (продолжение)

6. Получение интерференционной картинки для анализа

- Совместив круги более-менее по центру мы увидим «мишень»
- Чем больше полосок на «мишени» тем дальше мы от фокуса
- Чем дальше мы от центра интерференционной картины тем прямее будут линии
- Для анализа нам нужно несколько десятков разомкнутых полосок

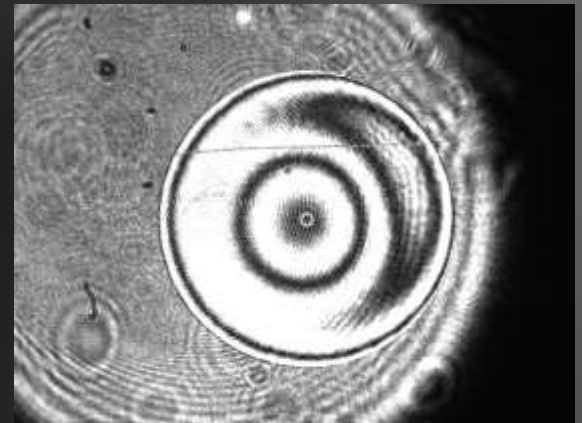
Далеко от фокуса



Близко к фокусу
(то что надо)



Практически в фокусе

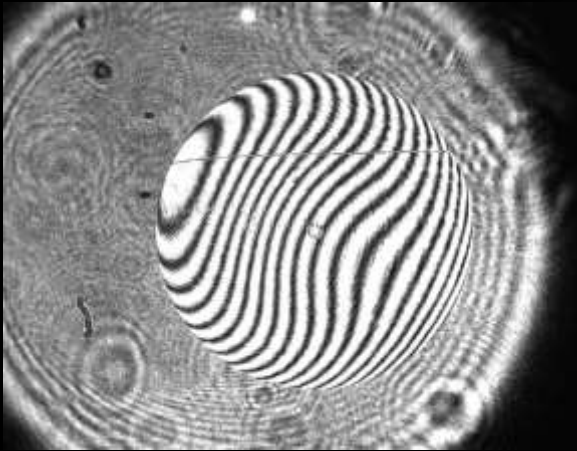


Настройка интерферометра (продолжение)

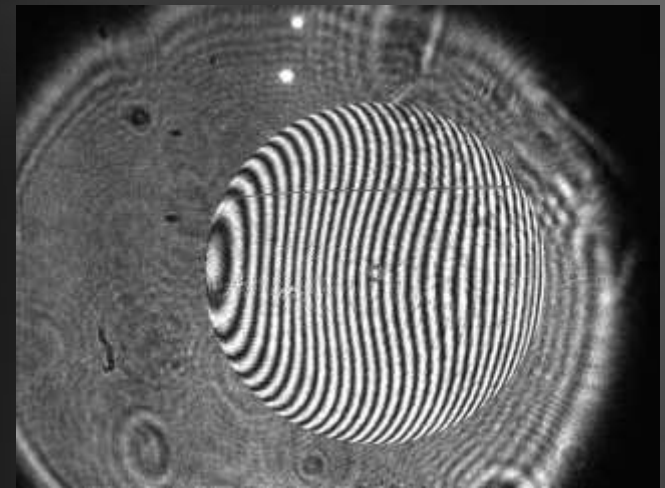
6. Получение интерференционной картинки для анализа (продолжение)

- Проводить анализ интерферограмм можно используя ручную-автоматическую трассировку полос или FFT Анализ
- В первом случае нам нужно получить 10-20 полос, во втором 30-50 полос дают лучший результат
- Картинка не должна быть пересвеченной и никакого сжатия с потерями!

Для трассировки полос
10-20 полос



FFT Анализ
30-50 полос



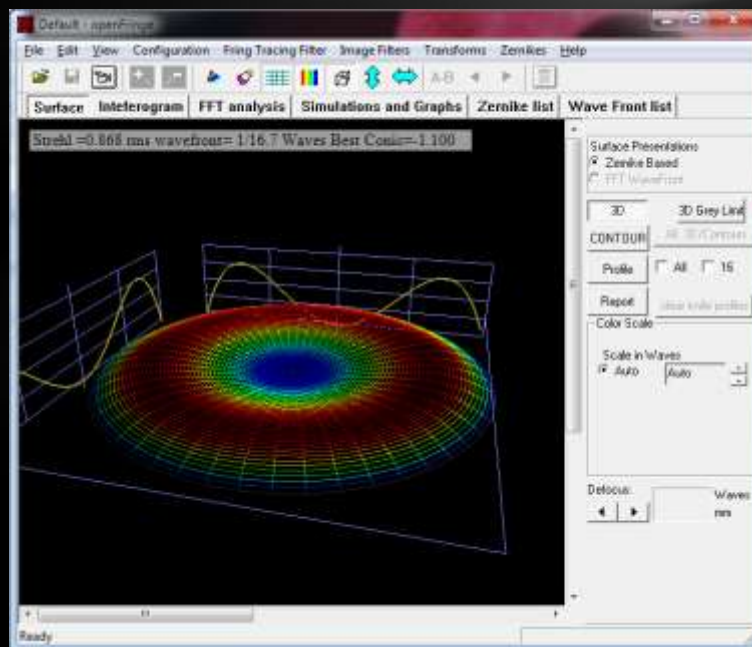
Анализ интерферограммы

Для анализа интерферограмм нам понадобится программа OpenFringe

Взять ее можно в группе Interferometry на Yahoogroups:

<https://groups.yahoo.com/neo/groups/interferometry/files/OpenFringe%20Beta/>

Распаковываем архив и запускаем OpenFringe.exe



Анализ интерферограммы

1. Вводим параметры исследуемого зеркала Configuration-Mirror/Test Parameters

- Диаметр зеркала
- Радиус кривизны (удвоенное фокусное). Очень важно знать точный радиус кривизны с точностью до нескольких мм. Его можно померять с помощью метода фуко «обнулив» (сделав серым) центр зеркала
- Conic constant -1 для параболы
- Wave length – длина волны лазера. 650 – красный, 632 – зеленый
- Artificial Null – выделяем если хотим посчитать отклонение от параболы

When entering English Units, clear the mm check box first. Units will be converted to mm on exit or you can check the mm check box before leaving. On re-entry units will be displayed as mm.

ID: Default

Mirror

☒ Units in mm

Diameter: 250.000

Roc: 2400.000

F Number: 4.800

Obstruction: 0

Conic Constant: -1

Interferogram

Wave length nm: 650

☒ Artificial Null: -1.132

☐ Double Pass

Fringe tracing

☒ One Color Traced ☐ Light and Dark Fringes Traced

Spacing in waves: 1

Igram image

☐ Flip Left/Right

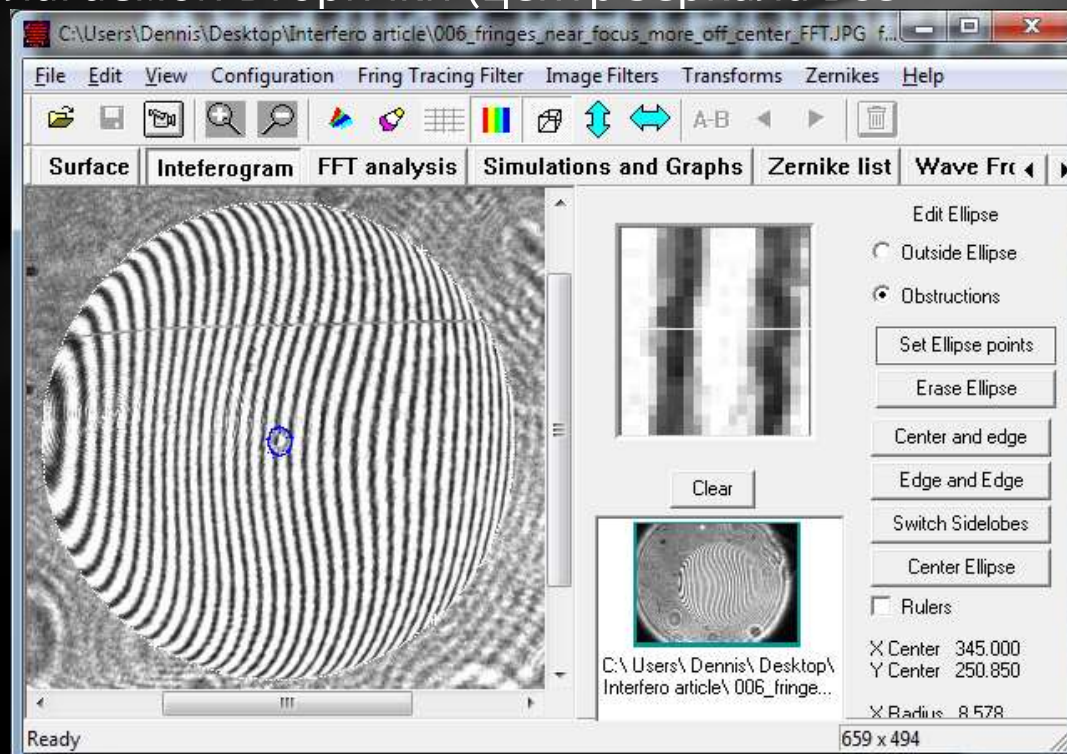
☐ Flip Vertically

OK Cancel Save in a File Read existing file

Анализ интерферограммы

2. Открываем файл с интерферограммой File-Open interferogram и с помощью мышки указываем края интерферограммы.

- Outside ellipse – внешний край зеркала
- Obstructions – тень от предполагаемой вторички (центр зеркала все равно не работает) или отверстие в зеркале
- Переходим на вкладку FFT



Анализ интерферограммы

3. Если изображение шумное, то нажимаем 5x5 Gaussian.

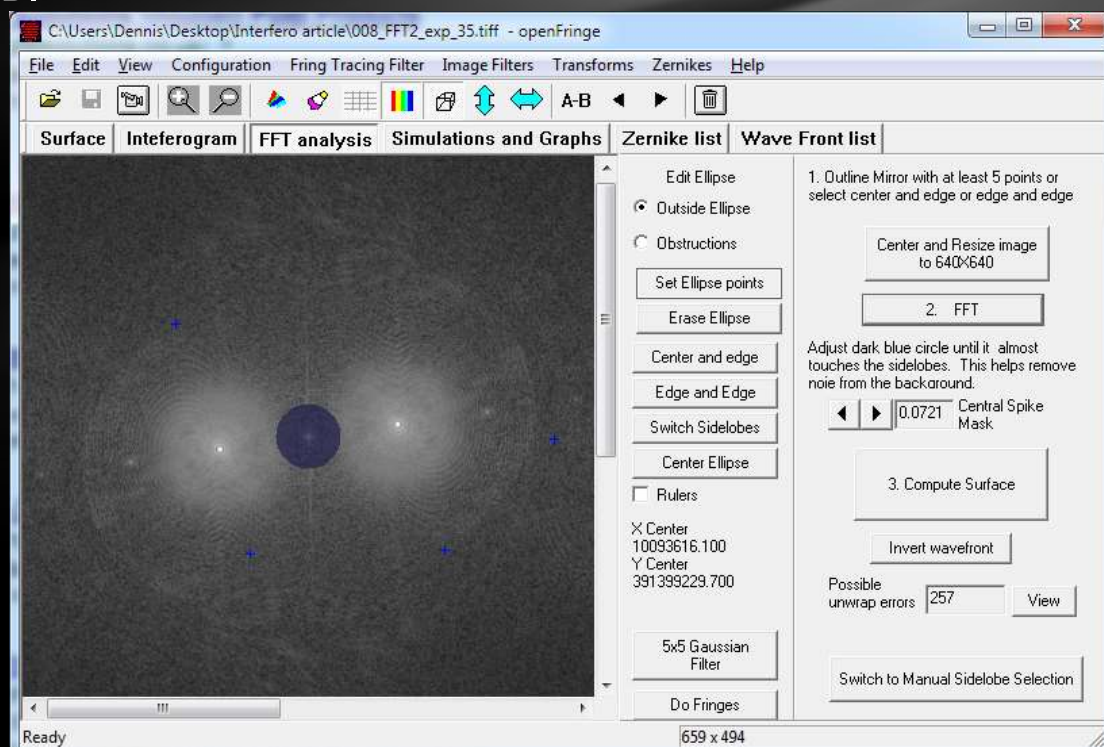
4. Нажимаем кнопку 2. FFT

5. Нажимая на кнопки вправо-влево рядом с подписью Central Mask Spike увеличиваем размер синего кружка на картинке до тех пор, пока он не станет касаться светлых кругов.

6. Нажимаем кнопку «Compute Surface»

7. Выбираем вкладку «Zernike List»

8. Нажимаем кнопку «Report»



Анализ интерферограммы

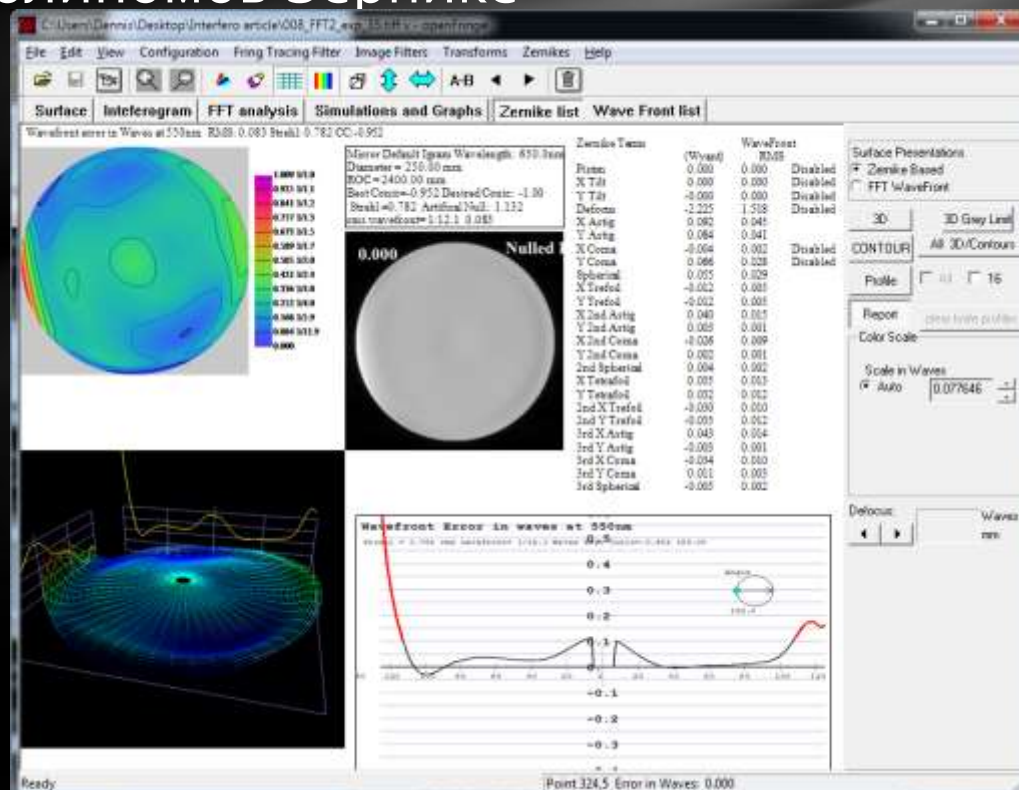
На отчете мы видим карту отклонений зеркала от идеальной параболы/сферы в 2D-3D

Синтетическую фукограмму

Значения коэффициентов полиномов Зернике

Расчитанные значения:

- Best Conic
- Strehl
- RMS Wavefront



Анализ интерферограммы

Best Conic – должно быть близко к 1 для параболы. 0 – это сфера, Между 0 и 1 – эллипс, больше 1 - гипербола

Strehl – Ты мой хороший. Ты мой сладкий». Значение около 0.8 – диффракционно ограниченное зеркало. Все что выше – отлично!

RMS Wavefront – Среднеквадратичное отклонение. Штрель 0.8 соответствует RMS $1/14$ длины волны света

Вывод по предыдущему зеркалу – ХОРОШЕЕ!

OC=-0.952

Mirror Default Igram Wavelength: 650.0nm
Diameter = 250.00 mm
ROC = 2400.00 mm
Best Conic = -0.952 Desired Conic: -1.00
Strehl = 0.782 Artificial Null: 1.132
rms wavefront = 1/12.1 0.083

Спасибо за внимание!