

МНОГОЦЕЛЕВОЙ ИНТЕРФЕРОМЕТР ДЛЯ ДВУМЕРНОЙ РЕГИСТРАЦИИ ИСКАЖЕНИЙ ВОЛНОВОГО ФРОНТА ПРОЗРАЧНЫМИ ОПТИЧЕСКИМИ ЭЛЕМЕНТАМИ

В. А. Кротов, А. В. Виноградов, Е. В. Поздняков

ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ», г. Саров Нижегородской обл.

Введение

Одним из ключевых моментов, определяющих характеристики излучения лазеров является качество составляющих его оптических элементов. В подавляющем числе случаев именно они определяют эти параметры.

К наиболее распространенным способам контроля качества оптических элементов и оптических трактов лазеров следует отнести гартмановские и интерферометрические методики.

Так на установке NIF [1] с применением метода Гартмана осуществляется тестирование оптического тракта лазера с последующей корректировкой фазовых искажений волнового фронта лазерного пучка с помощью адаптивной оптики.

Примером применения интерферометрической методики регистрации искажений волнового фронта в оптических элементах лазера может служить интерферометр, применяемый на установке AMPLAB [2]. С его помощью проводились измерения фазовых искажений волнового фронта, которые возникают в стеклянных дисковых активных элементах в процессе накачки.

В настоящем докладе представлены результаты разработки интерферометра, оптическая схема которого подобна схеме интерферометра [2].

Основная цель создания интерферометра это тестирование активных элементов лазера с зигзагообразным распространением излучения по активной среде [3]. Исходя из этого, была выбрана апертура интерферометра $20 \times 20 \text{ мм}^2$ и длина тестируемого пространства 80 см.

Разработана программа обработки исходных интерферограмм. Программа позволяет получать двумерное распределение фазовых искажений в тестируемых элементах.

Следует отметить, что оптическая схема интерферометра достаточно гибкая. И поэтому при соответствующем выборе оптических элементов можно реализовать интерферометр с апертурой до $400 \times 400 \text{ мм}^2$ и длиной тестируемого пространства в несколько метров, как это описано в работе [2].

1. Экспериментальный стенд

Оптическая схема интерферометра представляет собой некую модификацию известного интерферо-

метра Twyman-Green [2, 5]. Суть модификации заключается в применении в тракте опорного пучка оптоволоконного волновода. Основная цель, которая при этом преследовалась, это уменьшение величины шума в интерференционной картине, который возникает результате турбулентности при распространении в воздухе, а также механических вибрации элементов интерферометра. В интерферометре применен двойной проход по тестируемому элементу.

В рамках представленной работы создан стенд, представляющий собой такой интерферометр.

При создании стенда планировалось, что зондируемая апертура составит $20 \times 20 \text{ мм}^2$, а длина тестируемых стеклянных элементов до 500 мм.

Оптическая схема представлена на рис. 1.

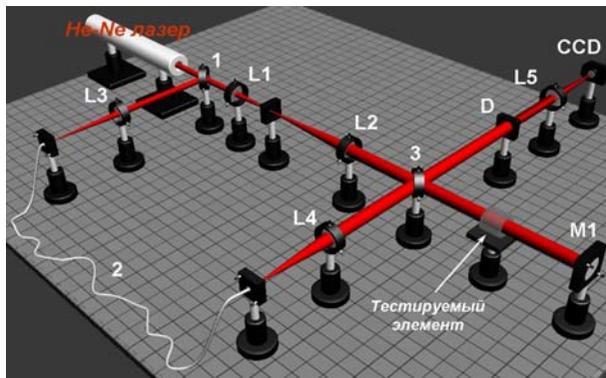


Рис. 1. Оптическая схема интерферометра. Основные элементы: источник света He-Ne лазер ($\lambda = 0,63 \text{ мкм}$); 1 – светоделитель; L1, L2 – телескоп; L3, L4 – линзы ввода и вывода излучения в оптоволоконно; 3 – клин; M1 – глухое зеркало; D – апертурная диафрагма $20 \times 20 \text{ мм}^2$; L5 – объектив; CCD – CCD камера 1024×1024 пикселей

Принцип работы интерферометра. Излучение зондирующего лазера расширяется телескопом L1, L2 и направляется на тестируемый элемент. Затем отразившись от зеркала M1 и клина 3 направляется на систему регистрации – CCD камеру. Это так называемый предметный пучок. Опорный пучок формируется на трассе светоделитель 1-L3-волоконно-L4. Затем он проходит клин 3 и также подается на систему регистрации, где оба пучка интерферируют. С помощью CCD камеры с пространственным разрешением 1024×1024 пикселей регистрируется двумерная интерференционная картина. Характерный вид картины представлен на рис. 2.

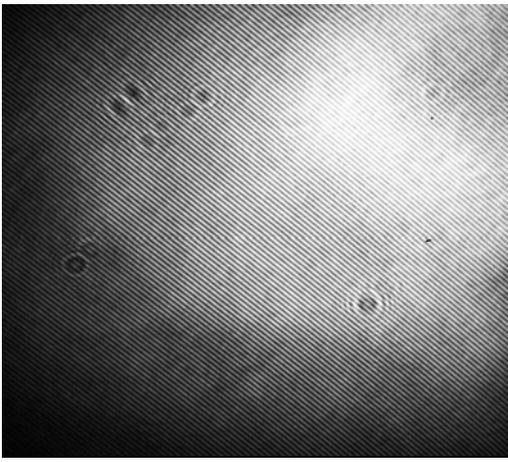


Рис. 2. Вид регистрируемой интерференционной картины

2. Алгоритм обработки интерференционных картин

Конечной целью экспериментов является определение величины фазовых неоднородностей тестируемых элементов. Для обработки регистрируемых интерференционных картин применен алгоритм, предложенный в работе [4]. В основе алгоритма лежит Фурье-преобразование исходного изображения с последующим анализом и выделением сигнала, несущего информацию о фазовых искажениях, обратного преобразования Фурье и выделения пространственного распределения фазовых искажений.

С аналитической точки зрения это выглядит так.

Исходную интерферограмму можно представить в виде:

$$g(x, y) = a(x, y) + b(x, y) \cos[2\pi f_{0x}x + 2\pi f_{0y}y + \varphi(x, y)], \quad (1)$$

где $g(x, y)$ – распределение интенсивности, x, y – пространственные координаты интерференционной картины; $a(x, y)$ – постоянная составляющая регистрируемого изображения; $b(x, y)$ – амплитуда интенсивности интерференционной картины, f_{0x}, f_{0y} – x, y составляющие пространственной частоты интерференционной картины и $\varphi(x, y)$ – фазовые искажения, вносимые в регистрируемую картину тестируемым элементом, а также собственными искажениями интерферометра.

Выражение (1) можно несколько видоизменить и представить в следующем виде:

$$g(x, y) = a(x, y) + c(x, y) \exp(i2\pi f_{0x}x + i2\pi f_{0y}y) + c^*(x, y) \exp(-i2\pi f_{0x}x - i2\pi f_{0y}y), \quad (2)$$

где

$$c(x, y) = (1/2)b(x, y) \exp(i\varphi(x, y)). \quad (3)$$

В 2-D Фурье пространстве выражение (2) будет представлять:

$$G(f_x, f_y) = A(f_x, f_y) + C(f_x - f_{0x}, f_y - f_{0y}) + C^*(f_x + f_{0x}, f_y + f_{0y}). \quad (4)$$

Селектируя сигнал, например, C (4), произведя обратное преобразование Фурье и проделав операцию логарифмирования, представляется возможным вычислить необходимый результат – $\varphi(x, y)$, т. е. фазовые искажения волнового фронта тестируемого оптического элемента:

$$\log[c(x, y)] = \log[(1/2)b(x, y)] + i\varphi(x, y). \quad (5)$$

Представленный алгоритм обработки исходных данных реализован в виде программы в среде MATLAB.

3. Оценка точности измерения фазовых искажений интерферометром с применяемым алгоритмом обработки интерферограмм

Для оценки точности сделано 10 регистраций фазовых искажений в «пустом» интерферометре. Интервал между регистрациями составлял около минуты.

На рис. 3 представлены фазовые искажения в «пустом» интерферометре в двух взаимно-перпендикулярных центральных сечениях. Величина фазовых искажений приведена в единицах длин волн зондирующего излучения (0,63 мкм) на один проход по тестируемому тракту интерферометра.

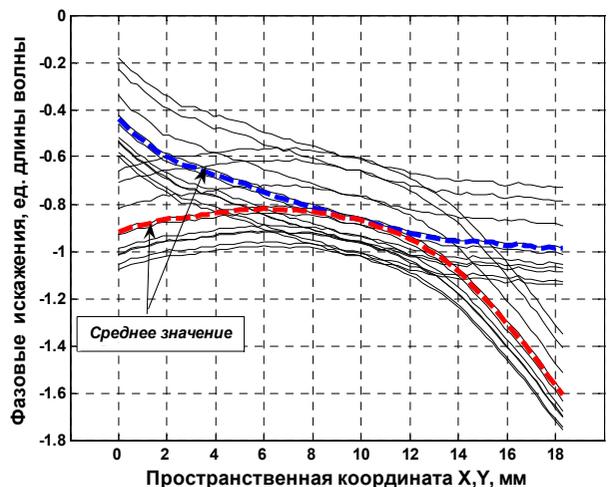


Рис. 3. Фазовые искажения в «пустом» интерферометре в двух взаимно перпендикулярных центральных сечениях. Выборка из 10-и экспериментов

Как видно из графика, регистрации имеют достаточно большой разброс. Среднеквадратичное отклонение составляет около $0,15\lambda$ (см. рис. 4). Види-

мо, столь высокий разброс связан с присутствующими при регистрациях механическими вибрациями помещения и самого стэнда.

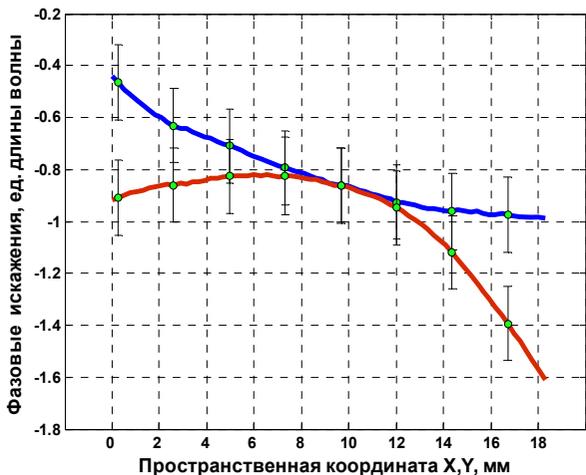


Рис. 4. Фазовые искажения в «пустом» интерферометре в двух взаимно перпендикулярных центральных сечениях. Среднее значение и среднеквадратичное отклонение

Однако следует заметить, что общий характер регистрируемых фазовых искажений подобен.

При практическом применении интерферометра его основное назначение это определение фазовых искажений в тестируемых элементах в относительных единицах, т. е. относительно какой-либо фиксированной точки поля зрения интерферометра.

Поэтому мы вправе приравнять фазу какой-либо точки поля зрения интерферометра к нулю (например, центр) и оценить точность регистрации в относительных единицах. В этом случае (см. рис. 5) интересующая нас точность регистрации (среднеквадратичное отклонение) будет составлять $0,007\lambda$.

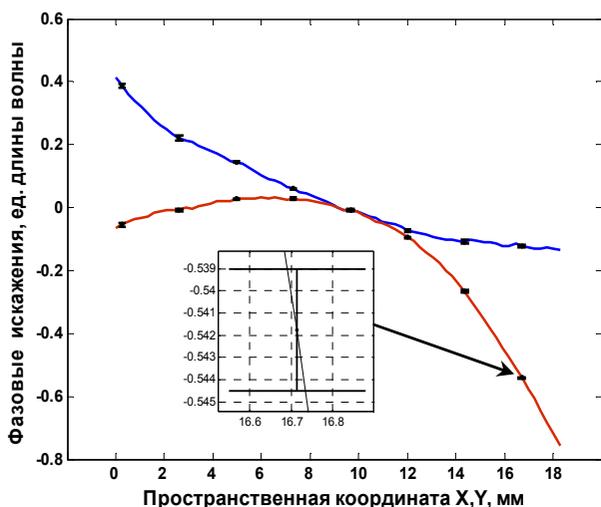


Рис. 5. Фазовые искажения в «пустом» интерферометре с нормированной фазой. Два взаимно перпендикулярные центральных сечения

Пространственное разрешение. Исходная интерферограмма регистрируется CCD камерой 1024×1024 пикселей. Согласно алгоритму при обработке исходных данных приходится «вырезать» из исходного Фурье-спектра приблизительно одну пятнадцатую его первоначальной величины. Естественно, при обратном преобразовании Фурье на эту величину должно уменьшиться и пространственное разрешение интерферометра.

Мы полагаем, что достаточно достоверную информацию о сигнале может нести 2 последовательных пикселя изображения. В этом случае достижимое пространственное разрешение при поле зрения $18 \times 18 \text{ мм}^2$ оценивается как $0,5 \text{ мм}$.

4. Тестирование оптических элементов с известными параметрами фазовых искажений

С целью проверки «объективности» фиксируемых фазовых искажений с помощью интерферометра и выбранного алгоритма обработки интерферограмм были проведены регистрации искажений волновых фронтов элементами с заведомо известными параметрами. Процедура тестирования содержала два этапа. На первом этапе тестировались фазовые искажения собственно интерферометра. На втором этапе регистрировались фазовые искажения при введении в интерферометр тестируемого элемента. Истинное значение фазовых искажений тестируемого элемента определялось с учетом собственных искажений интерферометра.

Очевидно, при двухэтапной регистрации фазовых искажений тестируемых элементов (тестирование собственно интерферометра и тестирование оптического элемента), точность регистрации упадет в $\sim 1,4$ раза. Поэтому реально можно рассчитывать на точность определения фазовых искажений $\sim 0,01\lambda$.

4.1. Тестирование линзы с фокусом $F \cong 39,7 \text{ м}$

На рис. 6 представлена исходная интерферограмма, регистрируемая в эксперименте, а на рис. 7 представлены фазовые искажения, которые вносятся в зондирующий пучок линзой. Там же приведена расчетная зависимость искажения фазы $\varphi(r)$ линзой, вычисленная по формуле (б):

$$\varphi(r) = 1/\lambda^* (n-1)^* r^2/2R, \quad (6)$$

где r – расстояние от оси линзы; R радиус кривизны сферической поверхности линзы; n – показатель преломления стекла; λ – длина волны зондирующего излучения.

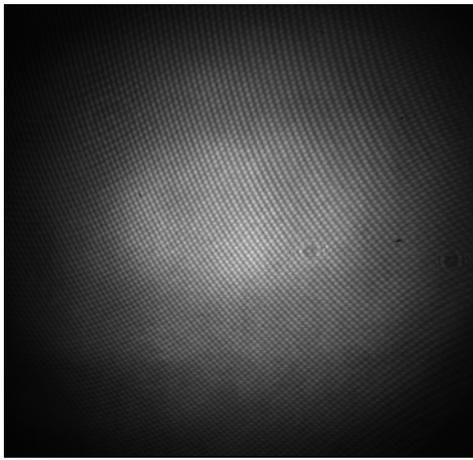


Рис. 6. Фазовые искажения в линзе $F \approx 39,7$ м. Исходная интерферограмма

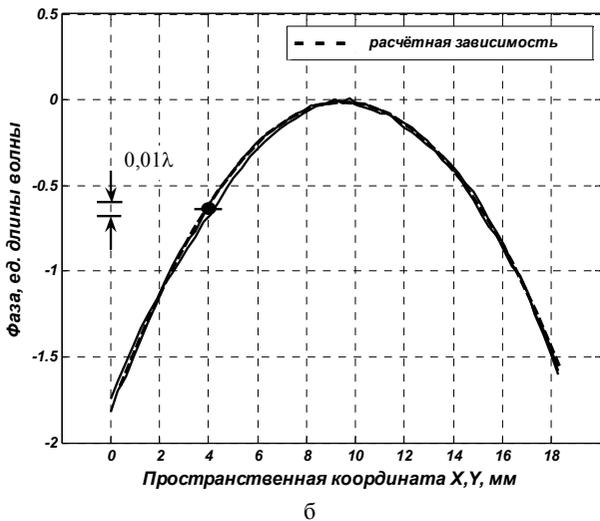
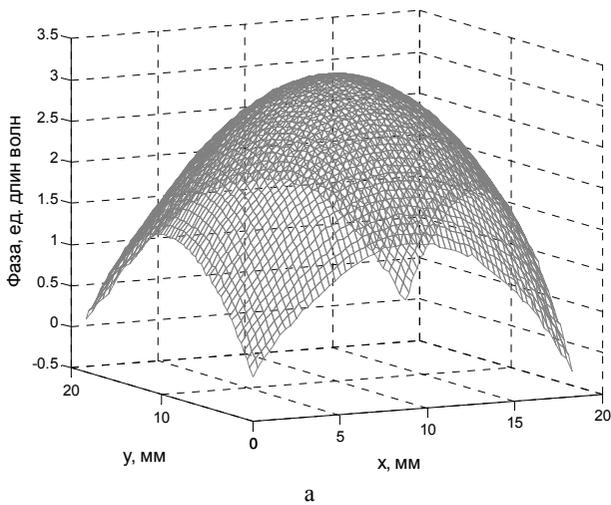


Рис. 7. Фазовые искажения в линзе $F \approx 39,7$ м. Двумерное изображение (а) и два взаимно перпендикулярных центральных сечения (б)

4.2. Тестирование плосковыпуклой линзы с радиусом кривизны выпуклой поверхности $R \approx 53,4$ м

На рис. 8 представлены фазовые искажения пучка, прошедшего линзу, в двух взаимно-перпендикулярных диаметральных сечениях.

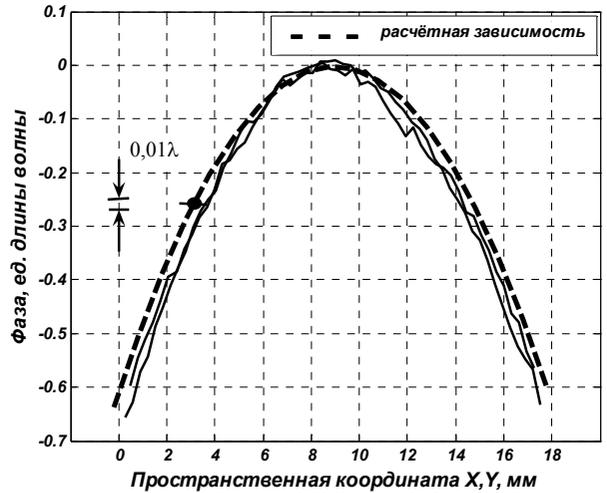


Рис. 8. Фазовые искажения в плосковыпуклой линзы с радиусом кривизны выпуклой поверхности $R \approx 53,4$ м. Два взаимно перпендикулярных центральных сечения

4.3. Тестирование оптического клина, $\Theta \approx (2 \pm 0,2) \cdot 10^{-4}$ рад ($0,66'$)

На рис. 9 представлены результаты регистрации искажений пучка оптическим элементом с одномерным искажением фазы – клином, в двух взаимно-перпендикулярных сечениях. В интерферометре клин был ориентирован так, что изменение фазы наблюдалось по одному направлению. Угол клина был измерен с помощью автоколлиматора из комплекта оптической скамьи ОСК-2.

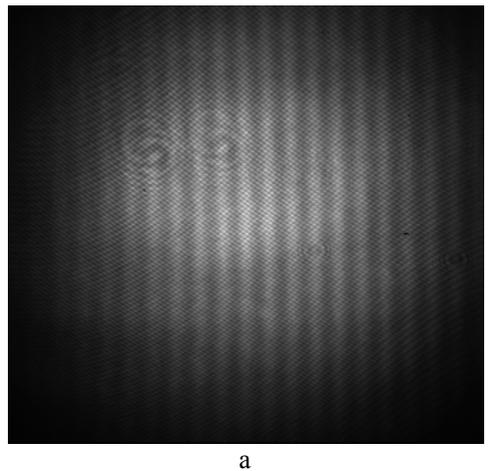


Рис. 9. Фазовые искажения пучка, прошедшего стеклянный клин с геометрическим углом при вершине $\Theta \approx (2 \pm 0,2) \cdot 10^{-4}$ рад. Исходная интерферограмма (а). Два взаимно перпендикулярных центральных сечения (б) (см. также с. 206)

5. Анализ результатов

Проведено тестирование предлагаемой конструкции интерферометра. Интерферометр позволяет регистрировать двумерные картины фазовых искажений с полем зрения $18 \times 18 \text{ мм}^2$ и длиной тестируемого пространства 80 см. Применяемый алгоритм обработки позволяет регистрировать фазовые искажения в диапазоне от $0,01\lambda$ до 10λ . По оценкам пространственное разрешение интерферометра составляет 0,5 мм. Как видно из результатов тестирования оптических элементов с известными параметрами, данные, полученные с помощью интерферометра, имеют хорошее согласие с расчетными. Это относится как к элементам с одномерным, так и двумерным искажением фазы.

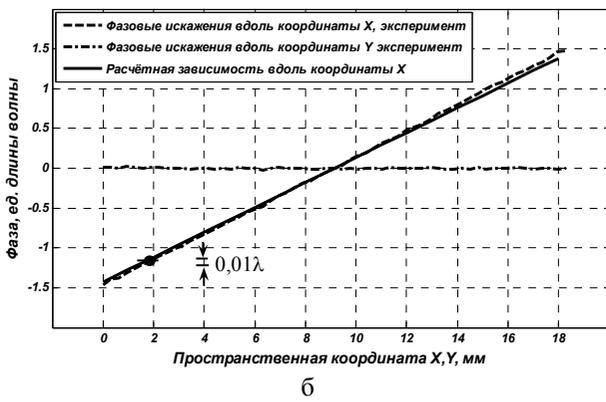


Рис. 9. Окончание

4.4. Тестирование оптического клина, $\Theta \cong (7 \pm 0,2) \cdot 10^{-4}$ рад (2,3')

Этот эксперимент был проделан скорее с целью определения предельных возможностей интерферометра, т. е. определения динамического диапазона регистрируемых фазовых искажений. Дело в том, что в основе алгоритма обработки лежит выделение боковых максимумов Фурье спектра исходных интерферограмм [4]. При этом необходимым условием является пространственное разделение боковых и центрального максимумов Фурье спектра. В конечном итоге это накладывает ограничение на максимальную величину регистрируемых искажений. В экспериментах путем подбора величины угла оптического клина были определены предельные возможности интерферометра с рабочим полем $18 \times 18 \text{ мм}^2$. Максимальный угол тестируемого клина составил $\Theta \cong (7 \pm 0,2) \cdot 10^{-4}$ рад (2,3'). На рис. 10 представлены результаты регистрации.

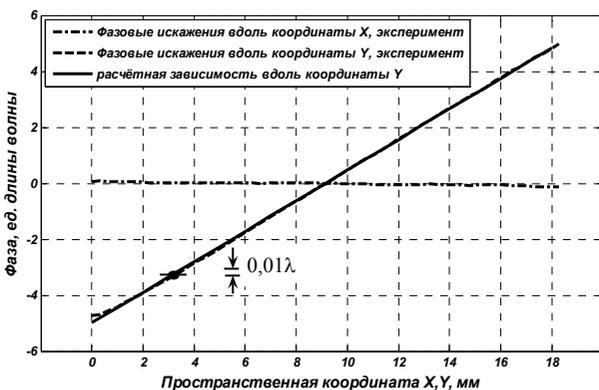


Рис. 10. Фазовые искажения пучка, прошедшего стеклянный клин с геометрическим углом при вершине $\Theta \cong (7 \pm 0,2) \cdot 10^{-4}$ рад. Два взаимно перпендикулярные центральные сечения

6. Тестирование качества обработки стержневых активных элементов

1-ый образец:

Качество обработки определялось с точки зрения фазовых искажений, возникающих при прохождении зондирующего излучения через активный элемент. Предполагается, что данный активный элемент будет применяться в импульсно-периодическом лазере с диодной накачкой [3]. Фазовые искажения регистрировались с помощью интерференционной методики на стенде, представленном на рис. 1. Поле зрения интерферометра было увеличено до $20 \times 20 \text{ мм}^2$. Фазовые искажения нормировались на единицы длин волн зондирующего излучения ($\lambda \approx 0,63 \text{ мкм}$).

Проведены измерения для случая штатного распространения зондирующего излучения (зигзаг, 8 отражений). Получены следующие фазовые искажения по апертуре активного элемента в центральных взаимноперпендикулярных сечениях (рис. 11).

Из графика видно, что наибольшие искажения возникают в направлении Y и их величина составляет около 5 длин волн. По характеру фазовых искажений активный элемент представляет собой цилиндрическую линзу и по оценкам ее фокусное расстояние составляет около $15 \div 20 \text{ м}$.

2-ой образец:

Этот образец тестировался следующим образом:

- **На первом этапе** проведены измерения фазовых искажений волнового фронта для случая, когда зондирующее излучение проходило вдоль оптической оси активного элемента без отражений.

- **На втором этапе** проведены измерения фазовых искажений волнового фронта с четырьмя, шестью и восьмью отражениями на проход внутри активного элемента.

Результаты регистраций проделанных на первом этапе представлены на рис. 12.

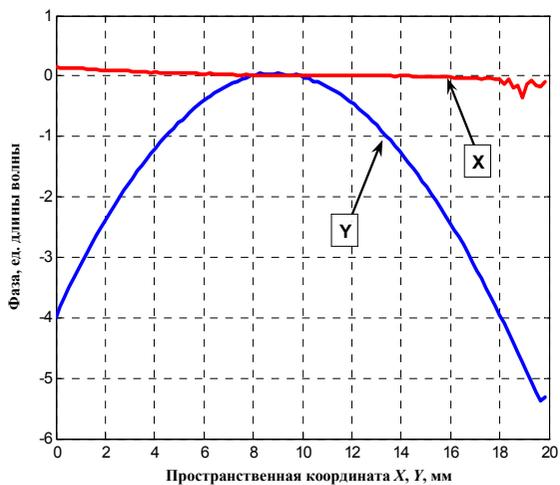
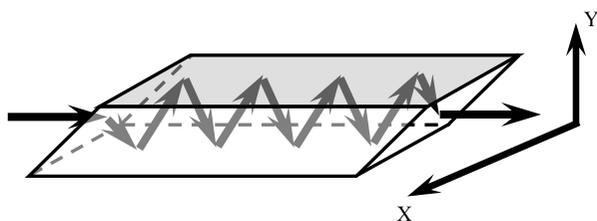


Рис. 11

Как видно из графиков, фазовые искажения возникают в направлении X и составляют $\approx 0,3\lambda$. Из этого можно сделать вывод, что торцевые грани активного элемента имеют цилиндрическую форму вдоль оси X с указанной величиной искажений.

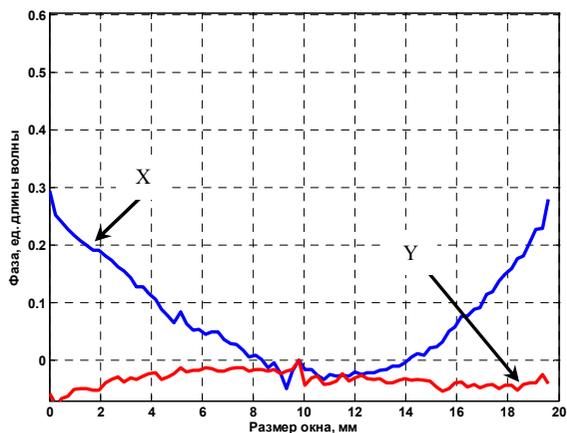
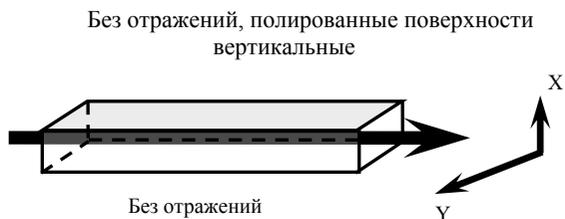


Рис. 12. Фазовые искажения в двух взаимно перпендикулярных центральных сечениях

На втором этапе проведены измерения фазовых искажений волнового фронта с 4, 6 и 8 отражениями на проход внутри активного элемента.

Для этих случаев получены следующие фазовые искажения по апертуре активного элемента в центральных взаимноперпендикулярных сечениях (см. рис. 13).

4 отражений на проход

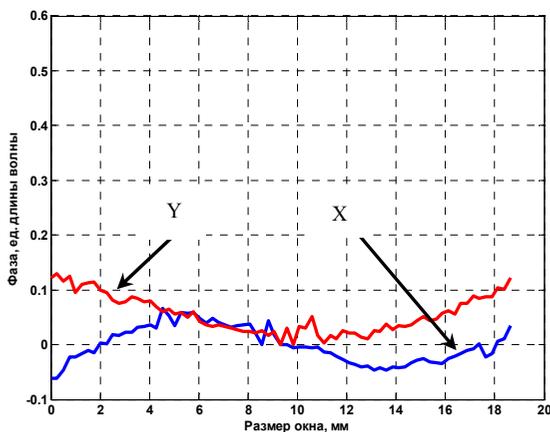
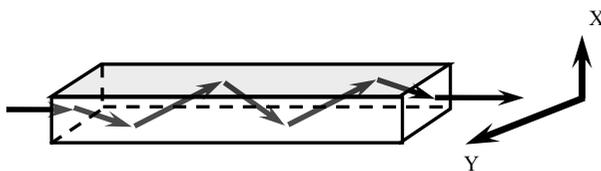
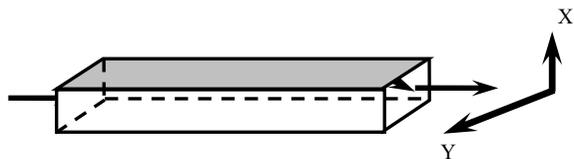


Рис. 13. Фазовые искажения в двух взаимно перпендикулярных центральных сечениях (см. также с. 208)

6 отражений на проход



8 отражений на проход

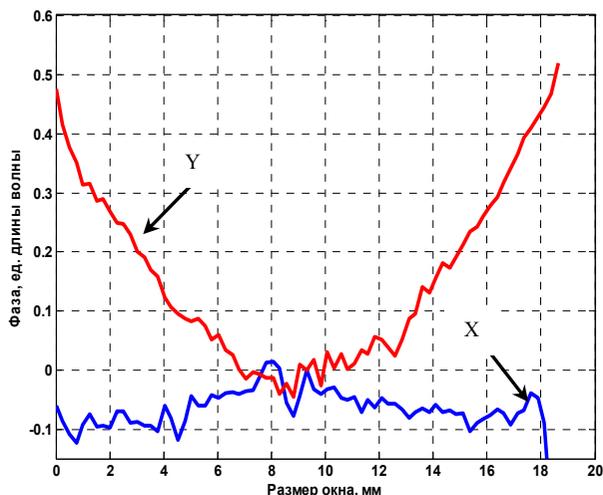
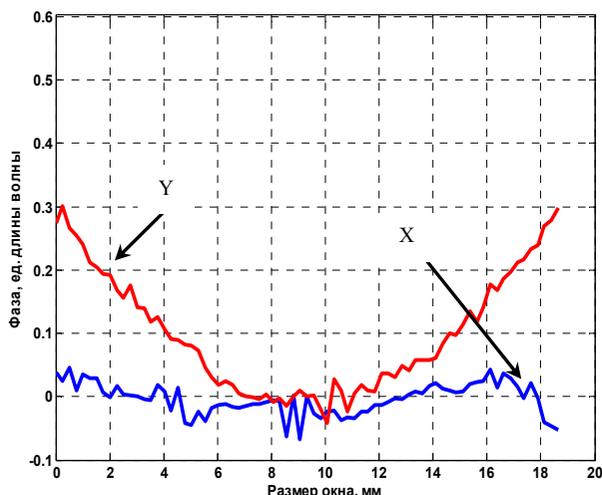
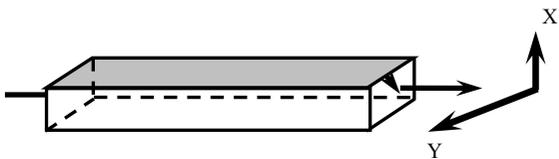


Рис. 13. Окончание

При зигзагообразном распространении излучения по активному элементу, с увеличением количества внутренних отражений фазовые искажения волнового фронта уменьшаются в X-направлении, но начинают возрастать в направлении Y. При максимальном количестве внутренних отражений 8 они достигают величины $0,5\lambda$. По-видимому, это связано с тем, что боковые поверхности имеют не идеальную плоскую поверхность, которая при малом количестве отражений приводит к компенсации суммарных искажений волнового фронта, в направлениях X и Y, но затем приводит к увеличению искажений в направлении Y. Как выяснено из экспериментов для данного образца активного элемента оптимальным с точки зрения оптических искажений является вариант распространения пучка с 4-мя отражениями от боковых граней.

Выводы

По результатам тестирования сделан вывод, что испытанный активный элемент (1-й образец) не соответствует качеству, необходимому для создания многокаскадного лазера, с зигзагообразным распространением излучения по активной среде. Предполагается, что оптическая схема лазера будет состоять из 6–8 последовательных активных элементов. Это, естественно, приведет к недопустимо большой величине расходимости на выходе лазера. Поэтому необходимо совершенствовать технологию финишной обработки активных элементов.

Это было сделано при изготовлении второго образца активного элемента. Здесь величина оптических искажений была уменьшена более чем в десять раз, что сделало возможным его применение в проектируемом лазере.

Заключение

Представлены результаты работ по созданию интерферометра, позволяющего регистрировать фазовые искажения волнового фронта в прозрачных оптических элементах. Выбранный алгоритм обработки исходных данных и созданное программное обеспечение позволяют регистрировать двумерные фазовые искажения.

Интерферометр с полем зрения $20 \times 20 \text{ мм}^2$ имеет параметры:

Пространственное разрешение около $0,5 \text{ мм}$.

Чувствительность прибора или ошибка измерений составляет $\sim 0,01\lambda$.

Динамический диапазон регистрируемых искажений от $0,01\lambda$ до 10λ .

С помощью оптических элементов с известными параметрами проведено тестирование интерферометра и алгоритма обработки данных. Показано, что данные, полученные с помощью интерферометра, имеют хорошее согласие с расчетными, как при одномерных, так и двумерных искажениях фазы.

Проведено тестирование качества обработки стержневых активных элементов на апертуре $20 \times 20 \text{ мм}^2$.

Для первого образца зафиксирована величина фазовых искажений волнового фронта около 5λ , при распространении излучения в штатном режиме зигзага. По характеру фазовых искажений вдоль оси Y активный элемент представляет собой цилиндрическую линзу с фокусным расстоянием около $15 \div 20$ м.

Для второго образца максимальная величина искажений волнового фронта наблюдалась для 8 отражений и составила $\approx 0,5\lambda$. Для данного образца оптимальным с точки зрения оптического качества является вариант распространения пучка с 4-мя отражениями от боковых граней с величиной искажений волнового фронта $\approx 0,15\lambda$.

Литература

1. Zacharlas A., Bliss E. S. et. al. Alignment and wavefront control systems of the National Ignition Facility, Opt. Eng. 43(12) 2873–2884 (December 2004).

2. Erlanson Al., Fulktrson S., Jancaities K. et. al. Physics Basis for Optical Performance of the NIF Amplifiers, LLNL, UCRL-ID-132680 NIF-0014142, January 11 1999.

3. Твердотельный импульсно-периодический лазер, излучающий цуг импульсов с частотой следования 100 МГц // В. А. Кротов, С. П. Мартыненко, И. И. Соломатин. Отчет о НИР (промежуточный) ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ», инв. № 13/Т-2241дсп, 2007.

4. Mitsuo Takeda, Hideki Ina* and Seiji Kobayashi. Fourier-transform method of fringe-pattern analysis for computer-based topography and interferometry. J. Opt. Soc. Am. Vol. 72, N 1. January, 1982.

5. Daniel Malacara, Manuel Servin, Zacarias Malacara. Interferogram Analysis for Optical Testing. CRC Press Taylor & Francis Group, 2005.