

ВЫСОКОТОЧНЫЕ ИЗМЕРЕНИЯ ОПТИЧЕСКОЙ НЕОДНОРОДНОСТИ

С. А. Бельков, И. Н. Деркач, В. В. Ладейщикова, Д. И. Лобачев, И. Е. Чернов

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

Введение

Современные мощные лазерные установки [1–2] представляют собой сложные многоканальные, многопроходные усилительные системы, причем каждый канал включает большое количество дорогостоящих оптических элементов. Достигнуть проектного значения энергии силовых каналов установки можно только при строгом соответствии параметров производимой оптики предъявляемым техническим требованиям. Одним из важнейших параметров является оптическая однородность материала. Существующие в настоящее время методы определения оптической однородности подразумевают наличие существенного клина на контролируемой детали, что не всегда приемлемо при проведении входного контроля.

В данной работе рассматриваются метод контроля оптической однородности материала плоскопараллельных элементов с углом клина менее $10''$ и световым диаметром до 600 мм на стенде широкоапертурного фазового интерферометра. Проведено исследование повторяемости применяемого метода контроля неоднородности. На основе этого метода был проведен входной контроль фосфатных и кварцевых стекол различных производителей.

1. Широкоапертурный интерферометр фазового сдвига

ШИФС предназначен для измерения отражающих и преломляющих оптических элементов с пло-

скими поверхностями световым диаметром до 630 мм. [3]

Контроль оптических элементов осуществляется путем измерения искажений волнового фронта излучения при его прохождении через элемент или отражении от контролируемой поверхности в трех пространственных диапазонах, имеющих следующие пространственные масштабы неоднородностей: 630 – 33 мм, 33 – 2,5 мм и 2,5 – 0,12 мм. Технические характеристики интерферометра приведены в табл. 1.

Оптическая схема стенда приведена на рис. 1.

Лазерное излучение проходит сквозь светоделительную пластину и телескопическую систему из линз L_1 и L_2 . Опорное излучение отражается от эталона \mathcal{E}_1 , рабочее излучение проходит через исследуемый элемент, находящийся в рабочем положении и отражается от эталона \mathcal{E}_2 . Затем опорное и рабочее излучения, отразившись от светоделительной пластины, попадают на светоделительный куб. Далее излучение разделяется и направляется сквозь объективы на камеры широкого и узкого поля зрения, которые регистрируют интерференционную картину.

В данной схеме при контроле оптических элементов на отражение эталоном выступает пластина \mathcal{E}_1 , а при контроле оптических элементов на проход эталонами являются пластины \mathcal{E}_1 и \mathcal{E}_2 .

Эталон \mathcal{E}_2 вместе с оправой закреплен в узле, который обеспечивает ее регулировки угла в двух плоскостях. Кроме того, имеется возможность перемещения эталона \mathcal{E}_2 вдоль оптической оси; минимальное расстояние между эталонами \mathcal{E}_1 и \mathcal{E}_2 может составлять 10 мм, а максимальное – 800 мм.

Таблица 1

Технические характеристики ШИФС

	Название характеристики	Значения
1	Длина волны зондирующего излучения, нм	633
2	Апертура зондирующего пучка, мм	630
3	Поперечное разрешение в пространственном диапазоне I (630-33 мм), мм	0,63
4	Поперечное разрешение в пространственном диапазоне II (33-2,5 мм), мм	0,63
5	Поперечное разрешение в пространственном диапазоне III (2,5-0,12 мм), мм	0,1
6	Точность измерений	$\lambda/1000$
7	Повторяемость измерений	$\lambda/1000$
8	Разрешение фотоприемной системы, пикселей	1024×1024

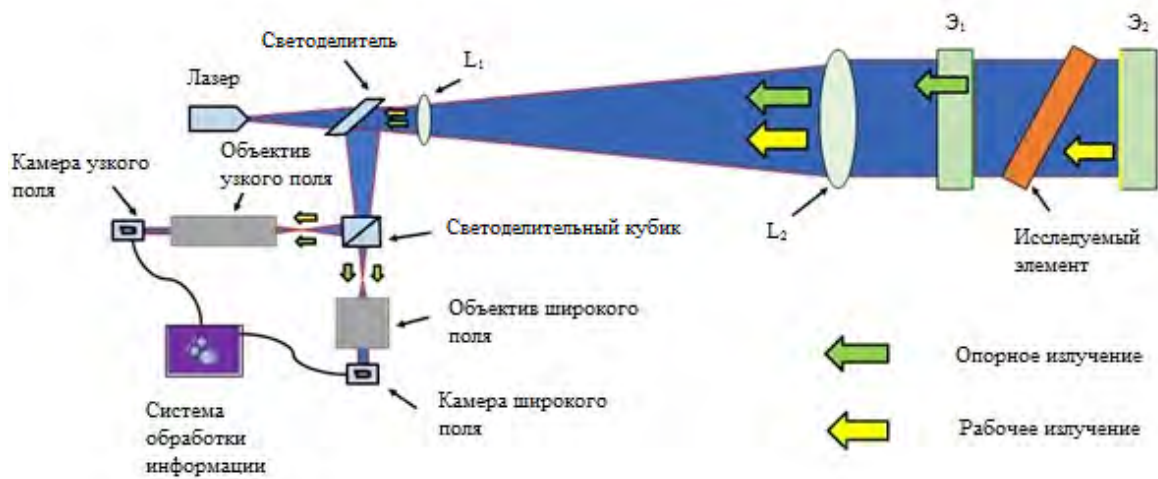


Рис. 1. Оптическая схема ШИФС

Контролируемый оптический элемент монтируется в зону контроля, расположенного между эталонами \mathcal{E}_1 и \mathcal{E}_2 . Узел образцов позволяет изменять положение контролируемого оптического элемента в трех ортогональных направлениях и углы элемента в двух плоскостях. Настройка положения оптического элемента в направлениях, перпендикулярных оптической оси интерферометра, позволяет выбирать на оптическом элементе измеряемую область. Изменение угла контролируемого оптического элемента в горизонтальной плоскости позволяет исследовать оптический элемент на проход под разными углами, в том числе под углом Брюстера.

На стенде ШИФС используется программное обеспечение Profi [3], которое подразделяется на три модуля:

1. Измерительный модуль предназначен для управления оптико-механическим блоком интерферометра и съема данных измерений.

2. Вычислительный модуль предназначен для расчета искажений волнового фронта и формы оптических элементов по записанным в файл интерференционным картинам. Данный модуль запускается из измерительного модуля и все параметры, необходимые для выполнения расчета, передаются вычислительному модулю из измерительного модуля. Настройки расчета задаются в диалоговом окне измерительного модуля.

3. Модуль визуализации и обработки предназначен для визуализации результатов измерений и их дальнейшей обработки с вычислением различных параметров волнового фронта.

2. Измерение неоднородности оптических элементов на стенде широкоапертурного интерферометра фазового сдвига

При измерении однородности материала, плоскостепенные оптические элементы делятся

на детали с углом клина менее $10''$ и углом клина более $2'$.

1. Угол клина детали менее $10''$.

Для контроля оптического элемента с углом клина менее $10''$, необходимо провести 3 измерения.

W_1 – результат измерения искажения волнового фронта прошедшего через образец, в качестве эталонов были использованы первая и вторая поверхности образца;

W_2 – результат измерения искажения волнового фронта прошедшего через образец;

W_3 – результат измерения искажения волнового фронта прошедшего через измерительную кювету без образца;

Для расчета отклонения показателя преломления Δn применяется формула (1):

$$\Delta n = \frac{(W_2 - W_3) \cdot n - W_1 \cdot (n - 1)}{d}, \quad (1)$$

где d – толщина исследуемого элемента, n – показатель преломления.

2. Угол клина детали более $2'$.

Для определения оптической однородности необходимо провести 4 измерения.

W_1 – результат измерения искажения волнового фронта отраженного от первой по ходу оптического излучения поверхности образца;

W_2 – результат измерения искажения волнового фронта отраженного от второй по ходу оптического излучения поверхности образца;

W_3 – результат измерения искажения волнового фронта прошедшего через образец;

W_4 – результат измерения искажения волнового фронта прошедшего через измерительную кювету без образца;

Для расчета неоднородности применить формулу (2):

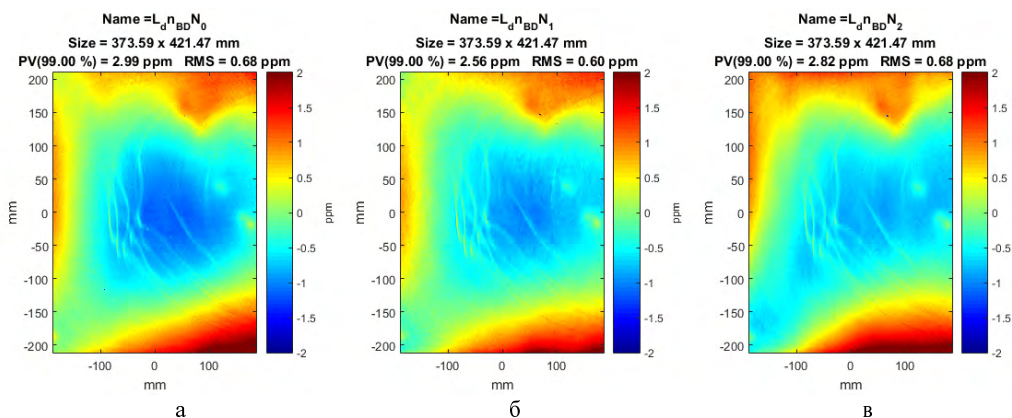


Рис. 2. Распределение отклонений показателя преломления АДЭ № 15 левой области измерения: а – до обработки поверхности материала, б – первое измерение после обработки поверхности материала, в – второе измерение после обработки поверхности материала

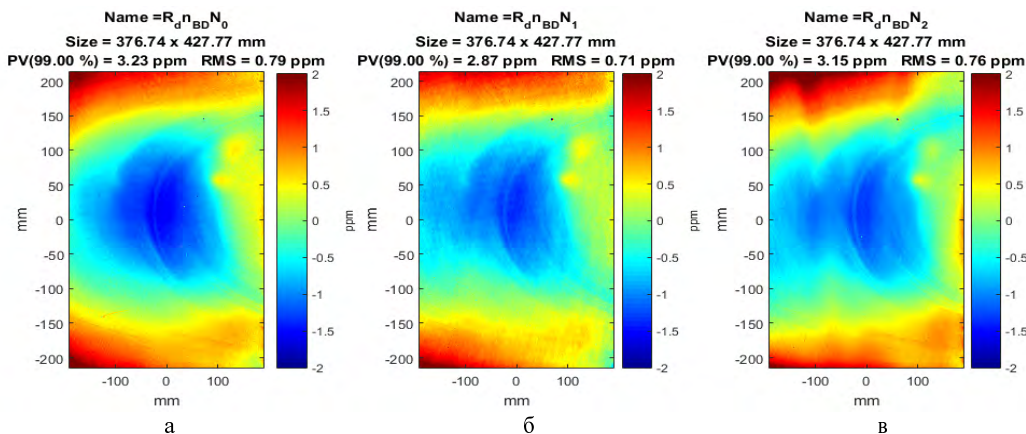


Рис. 3. Распределение отклонений показателя преломления АДЭ № 15 правой области измерения: а – до обработки поверхности материала, б – первое измерение после обработки поверхности материала, в – второго измерения после обработки поверхности материала

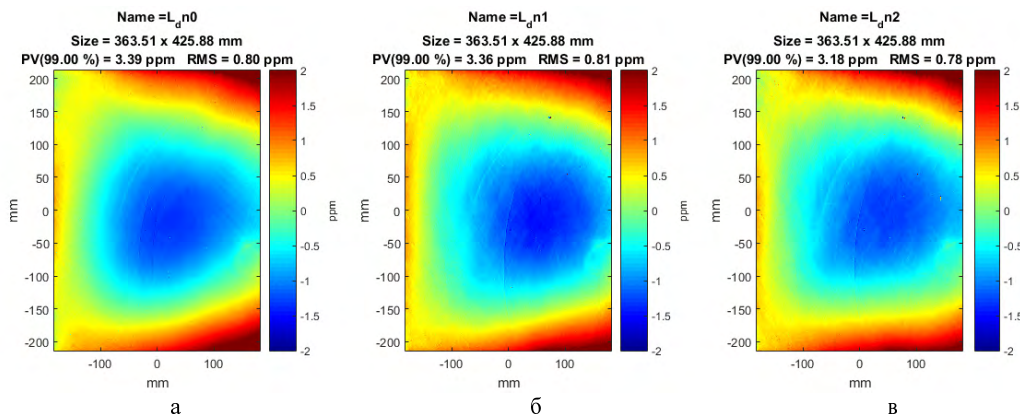


Рис. 4. Распределение отклонений показателя преломления АДЭ № 30 левой области измерения: а – до обработки поверхности материала, б – первое измерение после обработки поверхности материала, в – второе измерение после обработки поверхности материала

$$\Delta n = \frac{(W_3 - W_4) \cdot n - (W_2 - W_1) \cdot (n - 1)}{d}, \quad (2)$$

где d – показатель толщины исследуемого элемента; n – показатель преломления образца; Δn – отклонение показателя преломления.

3. Повторяемость измерений оптической однородности

Для определения повторяемости был проконтролирован один и тот же участок активных элементов № 15, № 30 в разный период времени (рис. 2, рис. 3, рис. 4, рис. 5). Для корректности сравнений

измеренные участки были совмещены и приведены к одному размеру с точностью до пикселя (см. табл. 2). Кроме того проведено исследование зависимости значения неоднородности от угла наклона исследуемого элемента, поскольку при контроле однородности измеряемый элемент необходимо наклонять под небольшим углом для уменьшения влияния «паразитной» интерференции (рис. 6).

4. Контроль оптической однородности фосфатных лазерных стекол и плавленого синтетического кварца

В рамках экспериментальной апробации ис-

пользуемого метода измерения был проведён контроль параметра оптическая однородность опытных образцов фосфатного лазерного стекла (рис. 7, рис. 8, рис. 9, рис. 10) и плавленого синтетического кварца (рис. 13).

Исследуемые оптические элементы различных производителей:

1. Дискový активный элемент – 22 штуки, производство Россия;
2. Дискový активный элемент – 1 штука, производство Китай;
3. Поляризатор (с покрытием) – 11 штук, производство Япония.

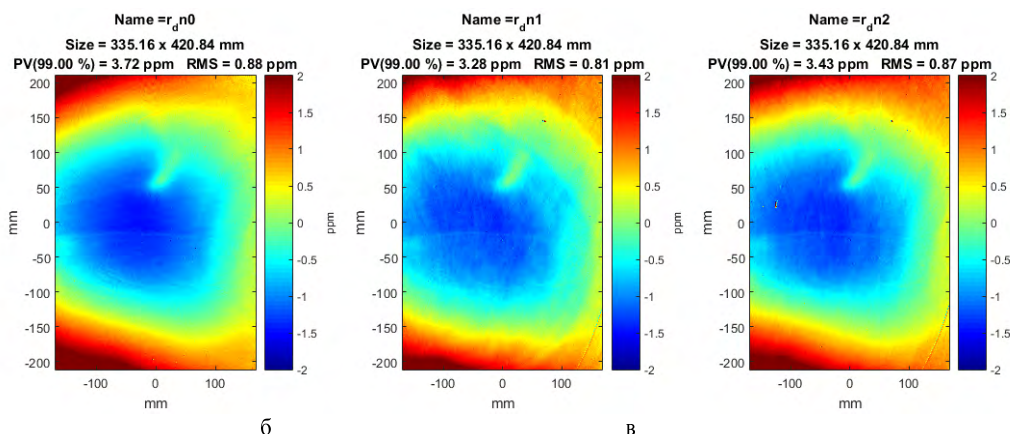


Рис. 5. Распределение отклонений показателя преломления АДЭ № 30 правой области измерения: а – до обработки поверхности материала, б – первого измерения после обработки поверхности материала, в – второго измерения после обработки поверхности материала

Таблица 2

Повторяемость измерений

№ АДЭ	Область измерения	До обработки поверхности	Первое измерение после обработки	Второе измерение после обработки	Максимальное отклонение от среднего
PV _{Δn} (99 %), ppm					ΔPV _{Δn} (99 %), ppm
15	Левая область	2,99	2,56	2,82	0,2
	Правая область	3,23	2,87	3,15	0,14
30	Левая область	3,39	3,36	3,18	0,08
	Правая область	3,72	3,28	3,43	0,24

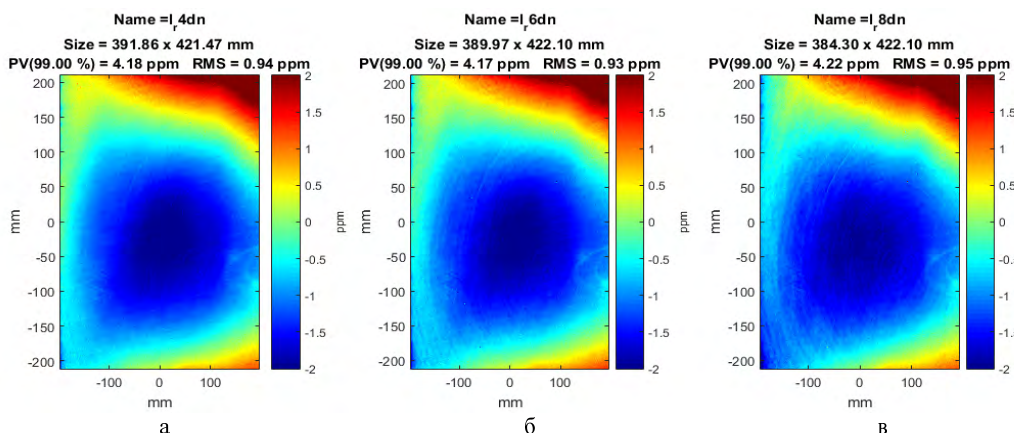


Рис. 6. Распределение отклонений показателя преломления АДЭ № 30: а – угол 4°, б – угол 6°, в – угол 8°

4.1. Фосфатные лазерные стекла (дисковые активные элементы)



Рис. 7. Максимальное отклонение показателя преломления АДЭ для левой области измерения



Рис. 8. Максимальное отклонение показателя преломления АДЭ для центральной области измерения



Рис. 9. Максимальное отклонение показателя преломления АДЭ для правой области измерения

Одной из причин превышения значений однородности над требуемой величиной являются локальные изменения внутренней структуры материала - «свилы». На рис. 11 видны характерные локальные

изменения внутренней структуры материала для АДЭ производства ЛЗОС.

Для сравнения на рис. 12 представлен АДЭ без видимых изменений структуры материала.

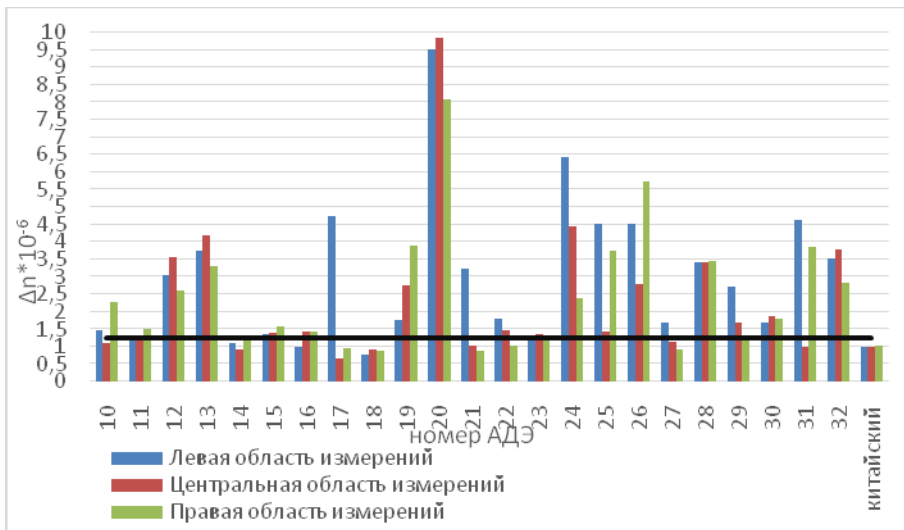


Рис. 10. Максимальное отклонение показателя преломления АДЭ

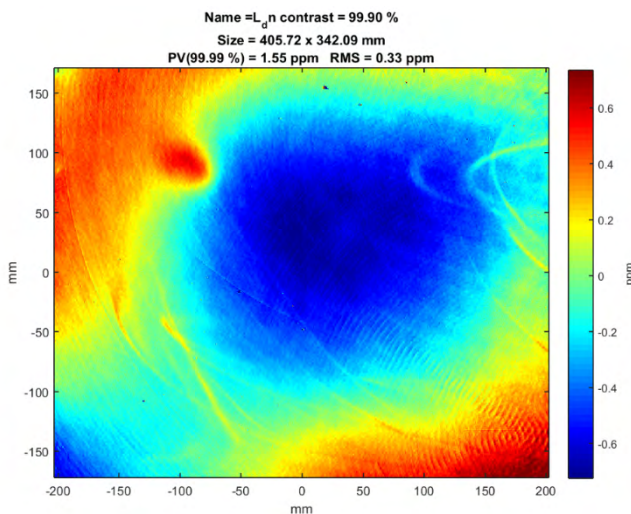


Рис. 11. Распределение отклонений показателя преломления локальными неоднородностями

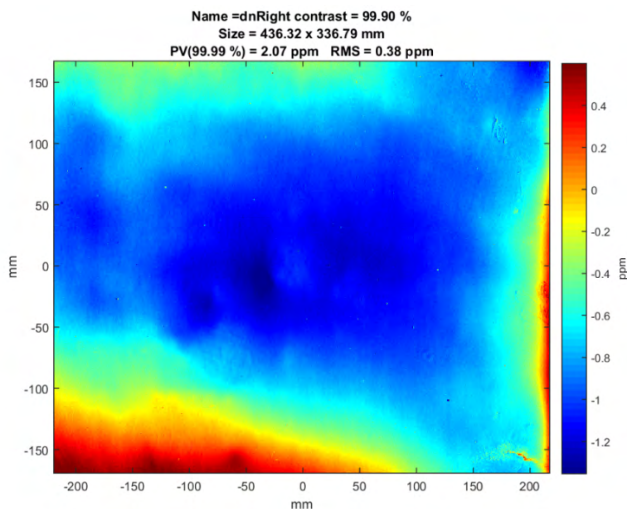


Рис. 12. Распределение отклонений показателя преломления АДЭ производства КНР

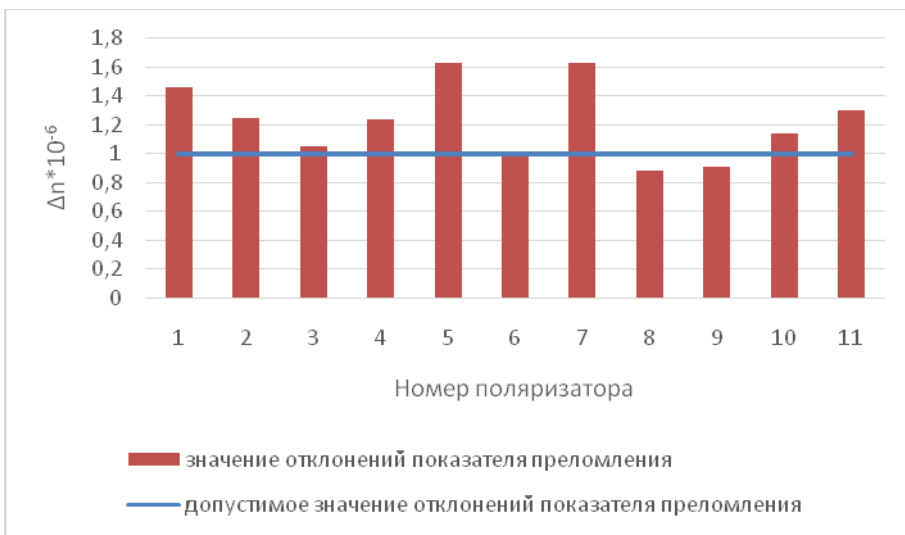


Рис. 13. Максимальное отклонение показателя преломления

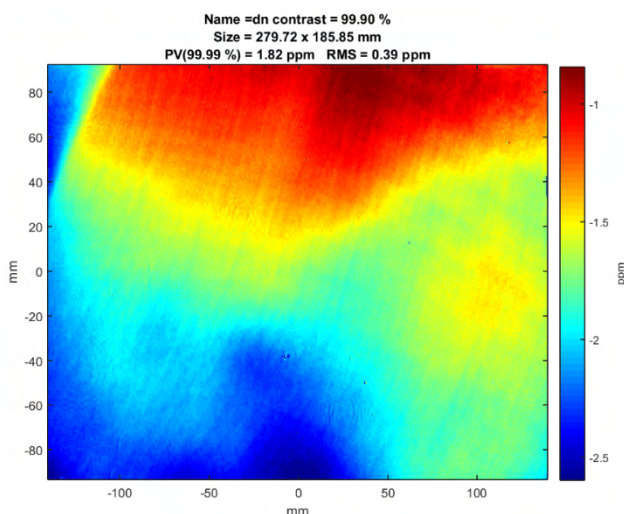


Рис. 14. Распределение отклонений показателя преломления поляризатора № 9

4.2. Плавленный синтетический кварц (поляризаторы)

На рис. 14 представлен поляризатор № 9 (с покрытием) без локальных изменений внутренней структуры материала.

Заключение

1. Представлен метод контроля оптической однородности плоскопараллельных широкоапертурных оптических элементов с углом клина менее $10''$ на стенде ШИФС.

2. Проведено исследование повторяемости значений оптической однородности одних и тех же образцов, подвергавшихся обработке. Исследование показало совпадение параметра максимального отклонения показателя преломления не хуже $0,125 \cdot 10^{-6}$.

3. Контроль опытных образцов фосфатного лазерного стекла выявил наличие локальных и глобальных дефектов, приводящих к ухудшению пара-

метра однородности. О результатах был поставлен в известность производитель, в настоящее время проводится улучшение технологии варки фосфатного стекла, легированного неодимом.

4. Контроль оптической однородности образцов плавленного кварца показал небольшое превышение значения максимального отклонения показателя преломления, до 60 % в худших случаях. Одной из причин ухудшения параметра оптической однородности является наличие покрытия на одной из сторон поляризаторов. По полученным результатам можно сделать вывод о неприменимости метода контроля однородности для деталей с покрытиями.

Литература

1. John T. Hunt, et al. "National Ignition Facility Performance Review 1999" LLNLICF September 2000. UCRL-LR-138120-99.

2. Galakhov I. V., Garanin S. G., Eroshenko V. A., Kirillov G. A., Kochemasov G. G., Murugov V. M., Rukavishnikov N. N., Sukharev S. A. "Concept of the Iskra-6 Nd laser facility" // *Fusion Engineering and Design*, 1999. V. 44, p. 51–56.

3. Кожеватов И. Е., Силин Д. Е. Широкоапертурный интерферометр фазового сдвига // Руководство по эксплуатации. ИПФ РАН, 2016.