## МОЛОДЕЖНЫЙ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ВЕСТНИК

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

Анализ методов измерения шероховатости поверхности и экспериментальное исследование диффузного рассеяния на базе рефлектометрического метода

Н. В. Барышников, Д. Г. Денисов,

И. В. Животовский, Каплин А.Ю.

УДК 681.787.8

МГТУ имени Н. Э. Баумана kartop-lan@yandex.ru

В настоящее время велик интерес к методам и средствам обработки и контроля качества оптических поверхностей крупногабаритных изделий. Так, например, проблема контроля качества оптических поверхностей стоит при создании активных элементов мощных лазерных установок [1,2] для термоядерного синтеза National Ignition Facility (NIF), а также при создании крупногабаритных оптических телескопов для астрономических и астрофизических исследований.

При производстве подложек крупногабаритных зеркал телескопов и активных сред мощных лазерных излучателей, являющихся полупрозрачными, предъявляются высокие требования к их качеству. Так как светорассеяние от зеркал и объективов телескопа может влиять на вид функции рассеяния, формируемый в фокальной плоскости (особенно при значительных апертурах), и, как следствие, вести к снижению качества изображения. А особое внимание к качеству поверхностей оптических элементов оптике и активных сред мощных лазеров уделяется потому, что наличие поверхностных и объёмных неоднородностей может приводить к изменению расходимости и модуляции излучения. И как следствие, к потерям выходной энергии или повреждению оптических элементов, вплоть до полного разрушения дорогостоящего прибора.

Реальная оптическая поверхность имеет сложный профиль, определяемый обработки и характеризующийся микро И макрогеометрией. методами микрогеометрии реальной поверхности относится шероховатость. Волнистость занимает промежуточное положение между макрогеометрией микрогеометрией, поскольку высотные шероховатости, параметры близки пространственный масштаб - к макрогеометрии.

На основании международных исследований внешних поверхностных и внутренних неоднородностей материала оптических элементов на качество пучка прошедшего через оптический элемент введена классификация неоднородностей оптических поверхностей [3], приведенная в таблице 1.

Таблица 1

Распределение параметров шероховатости по пространственному масштабу и пространственной частоте

	Диапазон 1		Диапазон 2		Диапазон 3		Диапазон 4
Пространственный масштаб	400–33		33-2,5		2,5-0,12		0,12-0,01
Пространственная часота	2,5×10 <sup>-3</sup> – 3×10 <sup>-2</sup>		3×10-2 - 0,4		0,4 - 8,3		8,3 - 100
Параметр	PV	гтѕ градиент (нм/см)	Rq (rms) (HM)	A (HM² × MM)	Rg (rms) (HM)	A (HM² × MM)	Rq (rms) (HM)
Стекло	0,33	7	1,8	1,0	1,6	1,0	0,4

Согласно этим исследованиям, если оптические элементы имеют параметры неоднородности поверхности (форма и шероховатость) не превышающие параметров указанных в таблице 1, то такой элемент можно использовать в мощных лазерных установках для NIF и в крупногабаритных оптических телескопах для астрономических исследований.

Каждый из параметров, указанных в Таблице 1, характеризует определенное фазовое искажение волнового фронта и рассеяние на объемных неоднородностях и шероховатостях поверхности. К этим параметрам относятся среднеквадратическое отклонение шероховатости поверхности (Rq), определяющее светорассеяние, и среднее расстояние между пиком и впадиной (PV), определяющее фазовое искажение волнового фронта. Так же помимо светорассеяния и искажения волнового фронта неоднородности приводят к появлению спеклструктуры в рассеянном излучении, которая так же будет снижать характеристики лазерных и телескопических систем. Оптика, удовлетворяющая требованиям, приведенным в диапазонах 3 и 4 (Таблица 1) позволяет получить информацию об объекте при очень небольшой величине принятого излучения, что открывает новые перспективы в разработках и исследованиях.

Современные технологии позволяют получать оптические поверхности, удовлетворяющие заданным требованиям (диапазоны 3 и 4 таблицы 1), однако проконтролировать выполнение этих требований достаточно проблематично, особенно в цеховых условиях при наличии вибраций. Для контроля качества поверхностей таких ответственных оптических изделий как активные среды и зеркала телескопов необходимо использовать бесконтактные оптические методы контроля. В этой связи задачей исследования является анализ оптических методов измерения параметров шероховатости нанометрового уровня зеркал, объективов и активных элементов.

К перспективным оптическим методам измерений параметров шероховатости оптической поверхности можно отнести: 1) логарифмический метод; 2) метод полного интегрального рассеяния (TIS); 3)метод с использованием интерферометра белого света; 4) метод динамической интерферометрии.

Логарифмический метод [4] основан на оценке параметра Rq по мощности излучения, отраженного шероховатой поверхностью в зеркальном направлении при двух углах падения. В этом методе мы пренебрегаем отличием оптических постоянных материала при разных углах падения, считая, что влияние коэффициента отражения гладкой поверхности и коэффициента диффузного отражения на мощность отраженного излучения пренебрежимо мало при разных углах падения. Схема измерения шероховатости по этому методу приведена на рисунке 1.

Конструктивно установка состоит из следующих элементов: лазерный излучатель, светоделительный кубик, зеркало, вращающийся прерыватель, фотоприемники. Излучение от лазера разделятся на два пучка с помощью светоделительного кубика. Далее пучки под разными углами  $\theta_1$  и  $\theta_2$  падают в одну точку на исследуемый образец. С помощью вращающегося прерывателя пучки по очереди освещают исследуемую

поверхность, и затем отраженные пучки регистрируются соответствующими фотоприемниками.

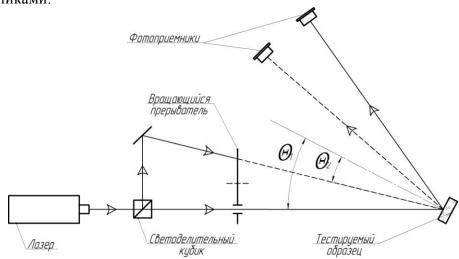


Рис. 1. Схема измерителя шероховатости по логарифмическому методу.

Параметр Rq оценивается по соотношению (1):



где,  $\lambda$  - длина волны падающего излучения,  $P(\theta_1)$  - мощность отраженного излучения при угле  $\theta_1$ ,  $P(\theta_2)$  - мощность отраженного излучения при угле  $\theta_2$ .

Метод полного интегрального рассеяния [5] основан на определении коэффициентов диффузного и полного отражения видимого света. Схема измерения шероховатости по этому методу приведена на рисунке 2.

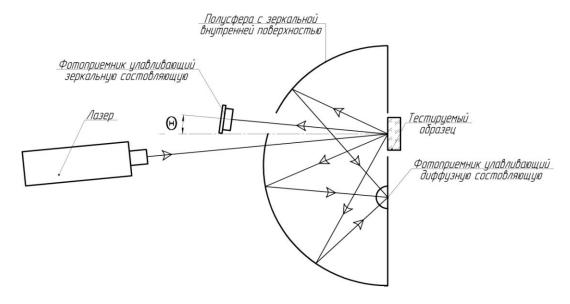


Рис. 2. Схема измерения по методу полного интегрального рассеяния

Измеритель полного интегрального рассеяния включает в себя: зеркальную сферическую поверхность, лазерный излучатель, два фотоприемника и блок обработки фотоэлектронных сигналов.

Излучение от лазера, проходя через отверстие в интегрирующей сфере, падает на образец, который может иметь произвольную кривизну поверхности. Зеркально отраженное излучение регистрируется первым фотоприемником. Свет, рассеянный образцом, многократно отражается в интегрирующей сфере и регистрируется вторым фотоприемником. На выходе фотоприемников формируются фотоэлектрические сигналы пропорциональные зарегистрированным мощностям.

Оценка Rq определяется по соотношению (2):

где  $\lambda$  - длина волны падающего излучения;  $\theta$  - угол падения;  $P_{\text{D}}$  - мощность диффузно рассеянного излучения;  $P_{\text{tot}}$  - величина полной мощности отраженного и рассеянного излучения.

Принцип действия интерферометра белого света [6] основан на интерференции опорного и измерительного пучков с пренебрежимо малой взаимной когерентностью. Схема измерения по этому методу приведена на рисунке 3.

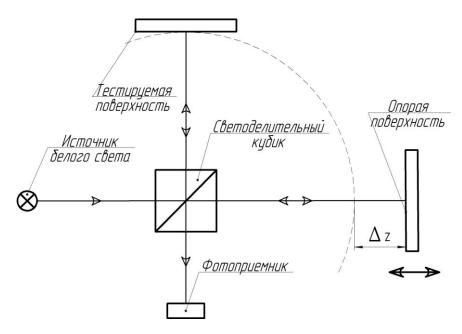


Рис. 3. Схема интерферометра белого света

Интерферометр состоит из: источника белого света, светоделительного кубика, опорной поверхности и фотоприемника.

Интерферометр представляет собой интерферометр Майкельсона, освещаемый источником широкополосного излучения. Излучение источника разделяется светоделительным кубиком на измерительный пучок, освещающий тестируемую поверхность, и пучок, освещающий опорную поверхность. Оптическая длина пути от светоделительной плоскости кубика до опорной поверхности может изменяться путем перемещения последней. Интерференция наблюдается только тогда, когда оптическая длина пути волновых фронтов от опорной и тестируемой поверхности — одинакова (Рис. 4.).

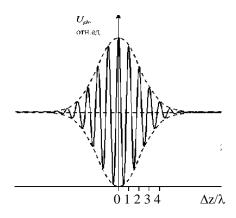


Рис. 4. Интерференция опорного и измерительного пучка в интерферометре белого света

В этом случае положение опорной поверхности, соответствующее максимуму интерференционной картины, принимается за ординату  $\Delta z$  шероховатой поверхности. Зависимость амплитуды сигнала на выходе фотоприемника от ординаты  $\Delta z = z_2 - z_1$  описывается соотношением (4):

$$(4)$$

где  $g\left(\frac{z_2-z_1}{c}\right)$  - взаимная комплексная степень когерентности излучения, отраженного опорной поверхностью и излучения, отраженного исследуемой поверхностью,  $I_1$  - интенсивность излучения отраженного от опорной поверхности,  $I_2$  - интенсивность излучения отраженного от тестируемой поверхности,  $z_1$  - длина пути от источника  $z_2$  - длина пути от источника  $z_3$  - длина пути от источника  $z_4$  - дли

Таким образом, путем сканирования вдоль контролируемой поверхности быть получена топограмма отклонений  $\Delta z(x,y)$  профиля шероховатой поверхности от средней плоскости. По зарегистрированной топограмме с помощью вычислительного комплекса могут быть определены параметры шероховатой поверхности, в том числе и Rq(y) по соотношению [ГОСТ 25142-82 Шероховатость поверхности. термины и определения. Издво Госстандарт, Москва, 1982]:

$$\begin{array}{c|c}
\hline
\end{array}$$
(5)

где L — базовая длина. Оценка параметра Rq в пределах участка поверхности  $L \times L$  получается путем усреднения полученных значений Rq(y). По зарегистрированной топограмме с помощью вычислительного комплекса могут быть определены параметры шероховатой поверхности, в том числе и Rq.

В динамическом интерферометре [7], в отличие от интерферометра белого света, отсутствуют подвижные элементы, что делает конструкцию привлекательной для использования в цеховых условиях. Схема интерферометра представлена на рисунке 5.

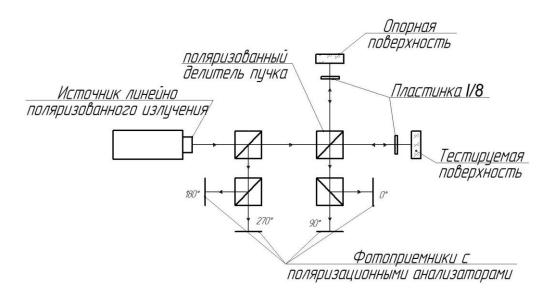


Рис. 5. Оптическая схема динамического интерферометра.

В состав динамического интерферометра входит лазерный источник когерентного излучения, делительный поляризационный кубик, четверть волновая пластинка, четыре фазовых анализатора и приемника.

Падающее излучение линейно поляризуется, затем попадает в двулучевой объектив, где разлагается на горизонтальную и вертикальную составляющие. Горизонтальная составляющая отражается от опорной поверхности и не меняет свою фазу, а вертикальная составляющая после отражения от исследуемой поверхности изменит свою фазу на  $\Delta \varphi$ . Далее и вертикальная и горизонтальная составляющая проходят через четверть волновую пластину, где преобразуются в круговую поляризацию. Затем сигналы интерферируют. Конечный сигнал может поступать как на четыре приемника с фазовыми анализаторами разной поляризации (0°, 90°, 180° и 270° например), так и на один матричный ПИ с наложенной на него фазовой маской. Фазовая маска состоит из прямоугольных зон с различной поляризацией (Рис.6 б). Каждому пикселю соответствует одна зона (Рис 6 а). Плоскости поляризации повернуты на некоторый угол друг относительно друга (как правило, на 90°). Таким образом, матрица представляет собой периодическую структуру, образованную группами по четыре пикселя.

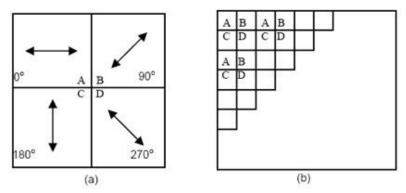


Рис. 6. Фазовая маска: а) Единичный элемент маски; (b) фазовая маска

Далее из интенсивности сигналов от четырех соседних пикселов получаем фазовое смещение отраженного сигнала, вызванное поверхностными неоднородностями в данной точке.



гле

$$Axy = \frac{1}{2}(I_{V} + I_{S} + 2\sqrt{I_{V}I_{S}}\cos(\Delta\phi x))$$
 (7)

 $Bxy = \frac{1}{2}(I_{V} + I_{S} + 2\sqrt{I_{V}I_{S}}\cos(\Delta\phi x) + \frac{7}{2})$  (8)

 $Cxy = \frac{1}{2}(I_{V} + I_{S} + 2\sqrt{I_{V}I_{S}}\cos(\Delta\phi x) + \frac{7}{2})$  (9)

 $I\phi xy = \frac{1}{2}(I_{V} + I_{S} + 2\sqrt{I_{V}I_{S}}\cos(\Delta\phi x) + \frac{37}{2})$  (10)

 $I_r$ - интенсивность сигнала отраженного от опорной поверхности;  $I_s$ -интенсивность сигнала отраженного от исследуемой поверхности. Далее по полученной топографии поверхности параметр Rq рассчитывается по соотношению (5).

У каждого приведенного оптического метода измерения параметров шероховатости есть свои достоинства и недостатки. Так например, интерферометр белого света свободен от недостатков когерентных интерферометрических измерений. Но из-за наличия в схеме подвижной опорной плоскости можно говорить о сильной зависимости от вибраций данного способа измерения.

Ошибка логарифмического метода в отличие от рассмотренных интерференционных методов связана с пренебрежением различия оптических постоянных материала поверхности при разных углах падения.

Динамический интерферометр не зависит от вибраций, так как измерение проводится за время одного кадра ПЗС матрицы, длящегося менее 1мс. А спектр вибраций не превышает 1 кГц. Полагаясь на результаты эксперимента, можно предположить, что ошибку в измерения шероховатости как в динамическом интерферометре, так и в методе полного интегрального рассеяния будет вносить спеклструктура отраженного излучения и диффузная компонента излучения рассеянная в зеркальном направлении.

Основные качественные показатели методов измерения шероховатости показаны в таблице 2.

Таблица 2

Таблица исследованных характеристик измерителей.

	Зависимость от вибраций	Зависимость от оптических постоянных	Зависимость от рассеяния на тыльной поверхности	Влияние спекл- структуры	Влияние нестабильности излучения	Исследованные диапазоны Rg , [нм]
Логарифмический метод	HET	ДА	HET	HET	ДА	10 - 100
Метод интегрального рассеяния	HET	HET	ДА	HET	ДА	1,2 - 100
Интерферометр белого света	ДА	HET	HET	HET	HET	15 - 120
Динамический интерферометр	HET	HET	ДА	ДА	HET	15 – 90

На основании таблицы 2 можно сделать выводы о применимости методов измерения шероховатости в зависимости от условий проведения измерений. Так, в

динамическом интерферометре для уменьшения влияния рассеянного излучения нужно использовать источник освещения с низкой степенью когерентности, интерферометр белого света больше подходит для лабораторных условий, а метод интегрального рассеяния и логарифмический метод требуют хорошей стабилизации мощности излучения и выходного пучка излучателя.

Проведен сравнительный анализ погрешностей измерения шероховатостей различных оптических методов.

Эталонным измерителем шероховатости считается контактный профилометр. Погрешность измерения параметров шероховатости других профилометров высчитывается относительно результатов контактного способа измерения [5][6]. На рисунке 7 показаны погрешности измерителей шероховатости относительно контактного профилометра.

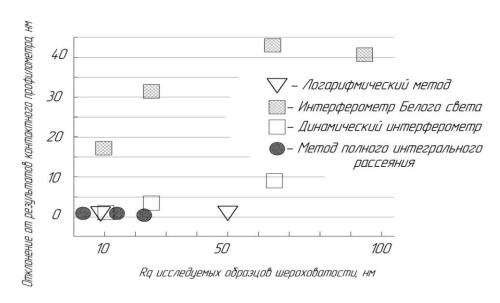


Рис. 7. Сравнительный анализ погрешностей измерителей шероховатости

Как видно из графика динамический интерферометр дает погрешность не более 3% относительно данных профилометра Talystep 1020 при измерении образцов с Rq = 10-20 нм. Метод полного интегрального рассеяния и логарифмический метод так же дают погрешность менее 3% относительно данных профилометра Talystep 1020 при измерении образцов с Rq = 1-20 нм и 10-50 нм соответственно.

Проведенный анализ позволяет сделать следующие выводы:

- 1) Метод интегрального рассеяния не может быть применен для измерения шероховатости оптических поверхностей, поскольку рассеяние на тыльной поверхности контролируемых изделий из полупрозрачных материалов существенно влияет на результаты измерений.
- 2) Логарифмический метод требует априорной информации об оптических постоянных поверхности, что ограничивает возможность применения этого метода в заводских условиях.
- 3) Интерферометрия белого света имеет более высокие погрешности измерений по отношению к другим проанализированным методам, вызванные влиянием вибраций на подвижные элементы конструкции интерферометра.
- 4) Наиболее предпочтительным методом оценки шероховатости оптических поверхностей является метод динамической интерферометрии, имеющий высокую устойчивость к вибрациям и не требующий априорной информации об оптических постоянных контролируемой поверхности.

В данной работе предложен метод и экспериментальный стенд (Рис.8.) для измерения параметра Rq по регистрации уровня интенсивности рассеянного излучения.

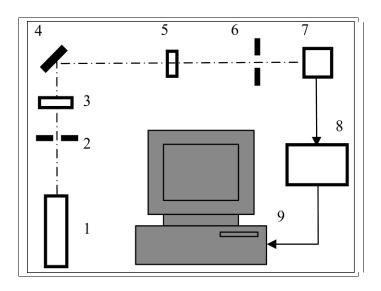


Рис. 8. Рефлектометрическая установка

Излучение от лазера 1 проходит через диафрагму 2 и поляризатор 3, далее пучок отражается от исследуемой поверхности 4 и проходит через светофильтр 5 и диафрагму 6. После пучок попадает в приемник 7, сигнал от которого поступает в усилитель 8 и затем выводится на компьютер 9. В роле источника излучения 1 был выбран лазерный модуль КLM-D635-х-5, так как расходимость пучка излучения составляет 0.5 мрад. в пределах 10 метров, а выходной диаметр всего 3.2 мм. Исследуемые поверхности 4 представляет собой одномерно шлифованные образцы со среднеквадратическим отклонением шероховатости 5 нм (образец №1), 10нм (образец №2) и 50нм (образец №3).

Особенность данного метода заключается в специфике измерения, связанной с функциональной зависимостью интенсивности рассеянного излучения от поверхностной и тыльной стороны астрозеркал от угла падения электромагнитного излучения.

При когерентном освещении шероховатой поверхности, поле отраженного излучения оказывается состоящим из вкладов от большого числа различных рассеивающих точек, совокупность которых представляет собой нормально развитую спекл картину. Таким образом, спеклы - это формируемая интерференционная картина нерегулярных волновых фронтов, образующаяся при падении когерентного излучения на шероховатую оптическую поверхность (Рис.9)

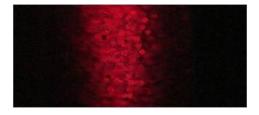


Рис. 9

Целью экспериментального исследования являлось определение вклада диффузного рассеяния в зеркально отраженную составляющую излучения и влияния спеклструктуры отраженного излучения на результаты измерений.

В эксперименте измерялась зависимость интенсивности излучения, рассеянного шероховатой поверхностью при угле падения, близком к нормальному (5°) для образцов №1, №2, №3. Интенсивность рассеянного излучения регистрировалась в диапазоне углов 5-50°. Результаты эксперимента представлены на рис. 10

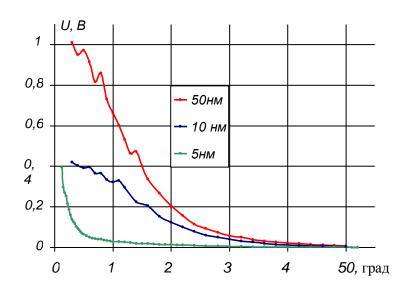


Рис. 10. Зависимость интенсивности рассеянного излучения от угла падения при разных Rq.

Как видно из рисунка 9 флуктуации интенсивности рассеянного излучения уменьшаются с уменьшением параметра Rq. Так например, относительная интенсивность при угле рассеяния  $5^{\circ}$  составляет 1.0, 0.4 и 0.05 для образцов №3, №2 и №1 соответственно. Так же можно отметить, что имеют место флуктуации каждого графика, и они особенно заметны в направлении зеркального отражения. На образце с Rq = 5 нм отклонения так же присутствуют, но в силу того что диффузная составляющая отраженного излучения резко спадает отклонения слабо выражены. Для образца №2 вклад диффузного рассеяния в зеркально отраженное излучение составлял 0.25%.

Так же с помощью описанной выше установки для образца №2 был снят ряд индикатрис диффузной составляющей отраженного излучения при разных углах падения - 3, 7, 15, 25 и 40° соответственно (Рис. 10.). Интенсивность рассеянного излучения регистрировалась в диапазоне углов 5-50° относительно направления зеркального отражения.

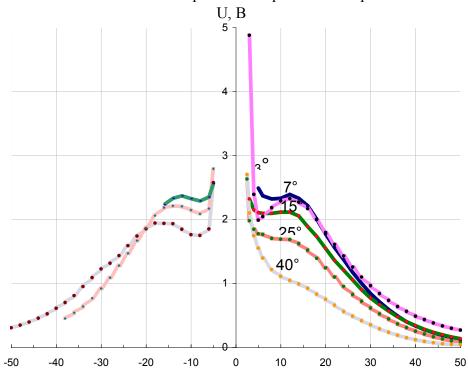


Рис. 11. Зависимость интенсивности рассеянного излучения

Как видно из графиков, при одном и том же интервале углов рассеяния (7-12°), независимо от угла падения излучения наблюдается неравномерность спада интенсивности. Это, и то что при проведении эксперимента образец был неподвижен, дает нам предположить, что скачкообразность спада при разных углах падения вызвана спеклструктурой отраженного излучения от неоднородностей поверхности на данном участке образца. Различие неравномерности спада при разных углах падения происходит из-за того, что доля диффузной составляющей при увеличении угла падения излучения-снижается (Рис.11.)

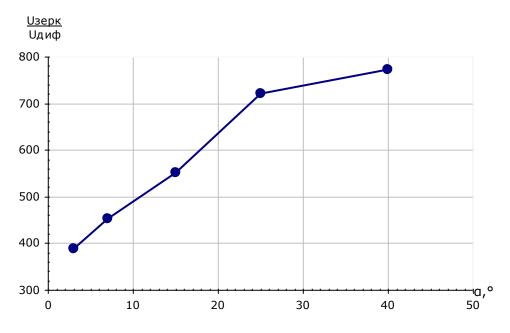


Рис. 12. Зависимость отношения  $\frac{U зер \kappa}{U \partial u \phi}$  от угла падения излучения.

Проведенный обзор наиболее перспективных методов измерения шероховатости нанометрового уровня показал, что наиболее перспективным методом для измерения среднеквадратического отклонения шероховатости оптической поверхности является метод динамической интерферометрии. Проведено экспериментальное исследование влияния диффузного рассеяния на интенсивность излучения, отраженного в зеркальном направлении, для поверхностей с параметром Rq, равным 5 нм, 10 нм и 50 нм. Установлено, что диффузное рассеяние приводит к флуктуациям интенсивности и вклад этого рассеяния в зеркально отраженное излучение составляет 0.25% для Rq = 10нм.

## Список литературы.

- 1. I. L. Bass, R. E. Bonanno, R. P. Hackel, and P. R. Hammond "High-average-power dye laser at Lawrence Livermore National Laboratory," Appl. Opt. v. 31, 6993-7006 (1992).
- 2. M. L. Spaeth, K. R. Manes, C. C. Widmayer, W. H. Williams, P. K. Whitman, M. A. Henesian, I. F. Stowers, J. Honig, "The National Ignition Facility Wavefront Requirements and Optical Architecture", Lawrence Livermore National Laboratory P.O. Box 808 L-466.

- 3. J. H. Campbell\*, R. A. Hawley-Fedder, C. J. Stolz, J. A. Menapace, M. R. Borden, P. K. Whitman, J. Yu, M. Runkel, M. O. Riley, M. D. Feit and R. P. Hackel "NIF optical materials and fabrication technologies: An overview" Proc. of SPIE v. 5341, 87-92 (2004)
- 4. S.-M. F. Nee, T.-S. Nee "Polarization of scattering by rough surfaces" Proc. SPIE 3426, 169-180 (1998)
- 5. .M. Bennett, Lars Mattsson "Surface roughness and scattering" (OSA, Washington, 1993).
- 6. H. Rhee, T. V. Vorburger, J. W. Lee, and J. Fu "Discrepancies between roughness measurements obtained with phase-shifting and white-light interferometry" Appl. Opt. v. 44, 5919-5927 2005.
- 7. N. Brock, J. Hayes, B. Kimbrough, J. Millerd, M. North-Morris, M. Novak and J. C. Wyant "Dynamic Interferometry" Proc. of SPIE 58750F-1, (2005)