

## Тема работы: ОПТИМИЗАЦИЯ МЕТОДА ИЗГОТОВЛЕНИЯ ВЫСОКОЭФФЕКТИВНЫХ ДИФРАКЦИОННЫХ ОПТИЧЕСКИХ ЭЛЕМЕНТОВ С ПРИМЕНЕНИЕМ ФОТОЛИТОГРАФИИ С ЗАЗОРОМ

Состав коллектива :

- Паньков Артем Владимирович — магистрант ФФ НГУ, лаборант.
- Корольков Виктор Павлович — руководитель лаборатории дифракционной оптики ИиЭ СОРАН, и.о. зав. лаб., д. т. н.
- Насыров Руслан Камильевич — старший научный сотрудник, к.т.н.

Научное содержание работы:

Мощные СО<sub>2</sub> лазеры широко используются для обработки и резки металлов. Лазерная технология обработки металлов обладает множеством достоинств, такими как возможность производить обработку только локального участка материала без нагрева остального объема и нарушения его структуры и свойств, возможность разрезать практически любые материалы независимо от их теплофизических свойств, возможность точной дозировки энергии и как результат возможность получать качественные соединения очень мелких деталей. Такая технология обеспечивает высокую производительность процесса в сочетании с высоким качеством поверхности реза и возможность осуществлять лазерную резку по сложному контуру.

Существует целый ряд технических проблем, возникающих при попытке усовершенствовать существующие системы лазерной резки. Одной из таких проблем является подбор оптических элементов для управления лазерным пучком. Оптические компоненты систем фокусировки в системах лазерной резки являются расходным материалом из-за нарастающего со временем количества дефектов, вызванных продуктами разрушения обрабатываемого материала. Поэтому актуальной является задача разработки экономичной фокусирующей оптики. Одним из вариантов решения проблемы является создание отражающего дифракционного фокусатора, микроструктура которого сформирована на поверхности медной водоохлаждаемой пластины. Такой дифракционный оптический элемент (ДОЭ) объединит в себе функции поворотного зеркала и фокусирующей линзы. Это позволяет сократить количество оптики, и тем самым существенно сократить потери излучения на отражениях, также упрощается настройка всей оптической схемы.

Проблемы использования ДОЭ при фокусировке мощного лазерного излучения состоят в том, что дефекты на поверхности фокусирующего ДОЭ могут рассеивать часть падающего на них излучения, а так же менять эффективное поглощение фокусатора. При работе с мощным лазерным излучением рассеяние даже малой части света может привести к повреждению не только обрабатываемого материала, но и оборудования. Малое изменение поглощения может привести к перегреву фокусатора и его уничтожению.

В работе использовалась фотолитографическая технология с печатью через зазор, так как она удовлетворяет следующим требованиям:

- Обеспечение высокой дифракционной эффективности ДОЭ.
- Возможность серийного производства.

- Простота формирования микрорельефа.

В процессе изготовления ДОЭ методом фотолитографии с печатью через зазор, на поверхности микрорельефа ДОЭ возникают характерные дефекты. Профиль дифракционного поворотного фокусирующего элемента (ДФФЭ), разработанного в ИАиЭ, является пилообразным и из-за наличия зазора между фотошаблоном и фоторезистом он искажается - возникает не вертикальный обратный скат пилообразного профиля (**Рис.1**).

Это приводит к уменьшению эффективности ДОЭ по формуле (**1**):

$$\eta_c = \left( \frac{\tilde{\Lambda}}{\Lambda} \right)^2 = \left( 1 - \frac{\varepsilon}{\Lambda} \right)^2 \quad (1)$$

где  $\eta_c$  - дифракционная эффективность,  $\Lambda$  - период пилообразного профиля,  $\varepsilon$  - величина обратного ската, а  $\tilde{\Lambda}$  - период без обратного ската.

Так как растриванный фотошаблон является амплитудной дифракционной решеткой с постоянным периодом, равным размеру ячейки растривания, на поверхности пилообразного профиля возникают периодические модуляции рельефа, близкие к синусоидальным, с периодом равным периоду растривания фотошаблона (**Рис.2**).

С увеличением зазора амплитуда синусоидальных модуляций рельефа падает, но при этом растет величина обратного ската, из-за чего уменьшается дифракционная эффективность ДОЭ.

**Были поставлены следующие задачи:**

- **Определить влияние синусоидальных модуляций рельефа.**
- **Определить оптимальный зазор между фотошаблоном и фоторезистом для достижения максимальной дифракционной эффективности ДОЭ.**
- **Определить оптимальный период растривания фотошаблона для достижения максимальной дифракционной эффективности ДОЭ.**

Ход работы.

Для исследования влияния синусоидальных модуляций рельефа был написан программный код, численно рассчитывающий эффективности дифракционных порядков отраженного и прошедшего излучения. Применялся метод Релеевского разложения излучений (представление прошедшего и отраженного излучений в виде суперпозиций плоских волн) с последующим решением уравнений Максвелла. Расчеты показали, что рассеяние при падении света под углом  $45^\circ$  на синусоидальную решетку, сформированную на поверхности медного зеркала, может быть значительным при неоптимальном выборе периода растра и достаточно большой глубине решетки. Был компьютерно промоделирован случай рассеяния света длиной 10.6 мкм на решетке с периодом 7 мкм в зависимости от глубины решетки и поляризации падающего света (**Рис. 3**).

Из **Рис. 3** видно, что для ТМ поляризованного света эффективность очень высока. Такой результат объясняется тем, что угол падения света на субволновую дифракционную решетку близок к углу Литтроу. Так как рассеивающая дифракционная решетка является субволновой, то она может рассеивать свет только в "0"-ой дифракционный порядок и "-1"-ый, паразитный дифракционный порядок. Для избавления от утечки энергии в паразитный дифракционный порядок следует уменьшить период растривания фотошаблона до такого размера, чтобы получаемая субволновая дифракционная решетка имела лишь "0"-ой порядок дифракции. Это достигается при выполнении условия:

$$d < \frac{\lambda}{(1 + \sin(\theta))} \quad (2)$$

где  $d$ -период растривания фотошаблона,  $\theta$ -угол падения рассеиваемого света,  $\lambda$ -длина волны рассеиваемого света. Учитывая характеристики ДПФЭ, период растривания фотошаблона должен быть меньше 6.2 мкм.

Для определения оптимального зазора был написан программный код, численно рассчитывающий распределение интенсивности света после прохождения фотошаблона заданной конфигурации. Применялся метод расчета интеграла Релея-Зоммерфельда при помощи быстро Фурье преобразования. Необходимо было задать параметры растриванного фотошаблона, распределение интенсивности света после прохождения которого рассчитывалось. Так как наличие модуляций рельефа вызвано строгой периодичностью растра фотошаблона, было предположено, что можно избавиться от данного эффекта путем использования фотошаблона со случайным размером ячейки растривания. По этой причине, помимо фотошаблона с регулярным размером ячейки растривания (**Рис.4 а**), расчеты проводились с фотошаблонами, при изготовлении которых применялось внедрение случайного распределения двух типов:

1. Смещение бинарных структур, отвечающих за пилообразный профиль ДОО, на случайную величину относительно начального положения по оси  $Y$  (**Рис. 4 б**).
2. Изменение размера рядов ячеек по оси  $Y$  (**Рис. 4 в**).

На **Рис.4** изображены функции пропускания растриванных фотошаблонов, распределения интенсивности света после прохождения которых были рассчитаны на расстояниях от 1 до 100 мкм с шагом в 1 мкм.

Рассчитанные распределения интенсивности представляют собой трехмерный пилообразный профиль, параметры которого необходимо определить и сравнить для различных фотошаблонов и зазоров. Важным параметром является величина обратного ската, она определяет эффективность ДОО с пилообразным профилем. Были определены средние обратные скаты для всех пилообразных профилей, а также посчитаны соответствующие им дифракционные эффективности. Результаты вычислений приведены в виде графиков на **Рис.5**. Как видно, внесение случайного распределения в растр фотошаблона слабо повлияло на величину обратного ската и дифракционную эффективность пилообразного ДОО. Данный этап проверки прошли оба случайных распределения.

Для дальнейшего сравнения были вычислены среднеквадратические отклонения полученных пилообразных профилей от идеальных пилообразных профилей по формуле:

$$RMS = \sqrt{\frac{\sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^N (I_{m,n}^{saw} - I_{m,n})^2}{M * N}} \quad (3)$$

где  $M$  и  $N$  количество точек по оси  $x$  и  $y$  соответственно, а  $I_{m,n}^{saw}$  – промоделированный и идеальный пилообразные профили. Такой параметр характеризует глубину модуляций рельефа на поверхности пилообразного профиля, являясь величиной ошибки поверхности моделируемого рельефа. Результаты расчета можно увидеть на **Рис.6**.

Минимум ошибки поверхности рельефа соответствует оптимальному зазору и достигается при использовании регулярного растра с зазором в 63 мкм. Использование фотошаблонов с внедренными случайными распределениями не привело к уменьшению амплитуды модуляций рельефа по сравнению с использованием фотошаблона с регулярным размером ячейки растривания.

Эффект от использования кластера в достижении целей работы.

Использование кластера позволило произвести все «тяжелые» математические расчеты, связанные с расчетом распределения интенсивности света после прохождения заданных

растров, в кратчайшие сроки. Это позволило численно определить оптимальный метод минимизации амплитуд модуляций рельефа ДОЭ с пилообразным профилем.

Публикации:

1. Паньков А. В., Корольков В. П., Насыров Р. К. Моделирование и оптимизация фотолитографической технологии изготовления дифракционного поворотного фокусирующего элемента для ИК диапазона //Интерэкспо Гео-Сибирь. – 2015. – Т. 5. – №. 1.
2. Паньков А. В., Корольков В. П., Насыров Р. К. ОПТИМИЗАЦИЯ МЕТОДА ИЗГОТОВЛЕНИЯ ВЫСОКОЭФФЕКТИВНЫХ ДИФРАКЦИОННЫХ ОПТИЧЕСКИХ ЭЛЕМЕНТОВ С ПРИМЕНЕНИЕМ ФОТОЛИТОГРАФИИ С ЗАЗОРОМ //Известия высших учебных заведений. Физика. - 2015. - Т.58 - №11-3 — стр.136-139

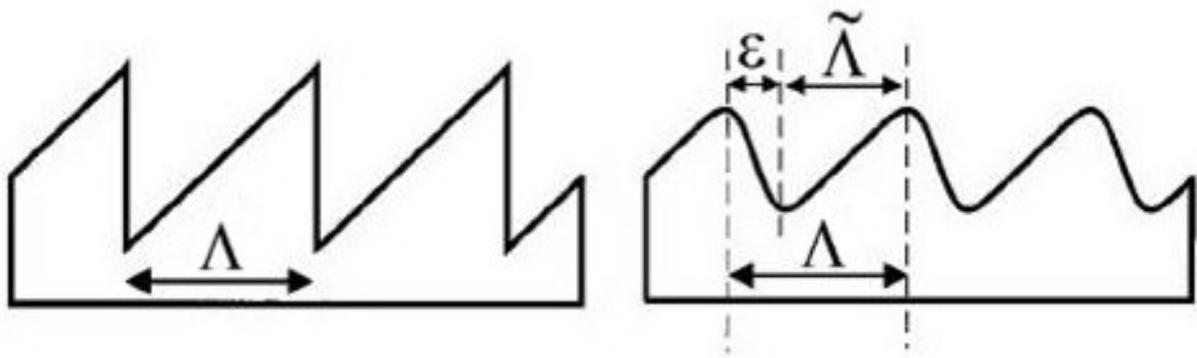


Рисунок 1: Пилообразный профиль и пилообразный профиль с обратным скатом  $\epsilon$ .

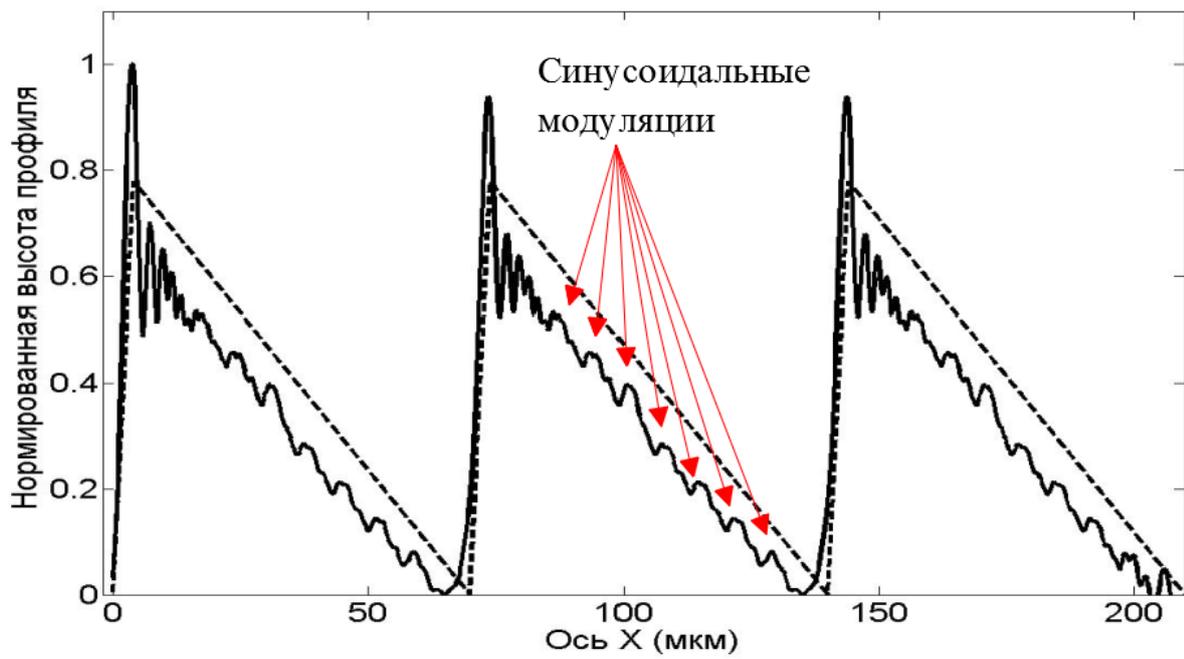


Рисунок 2: Пилообразный профиль по сравнению с компьютерно промоделированным профилем.

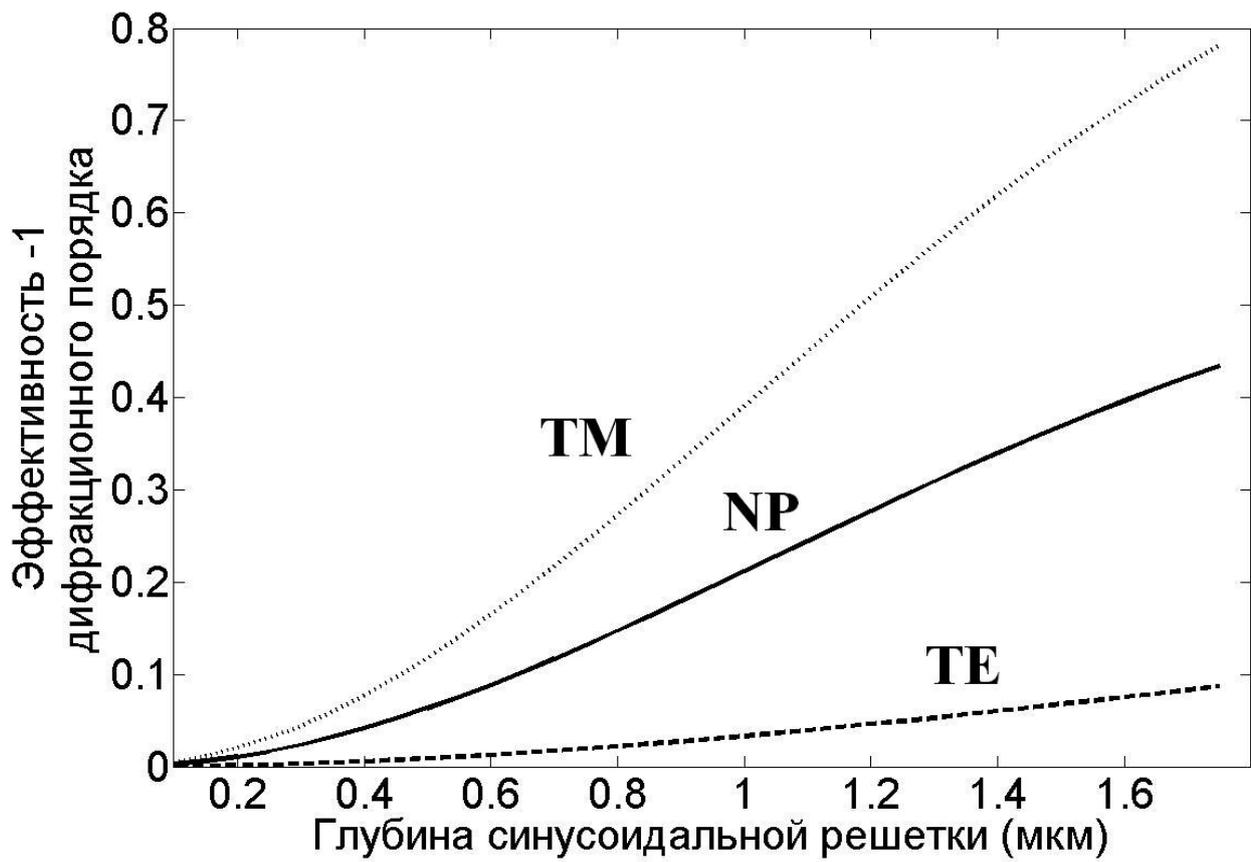


Рисунок 3: Компьютерное моделирование эффективности паразитного дифракционного порядка, при рассеянии света, падающего на субволновую синусоидальную решетку, сформированную на поверхности медного зеркала, под углом  $45^\circ$ .

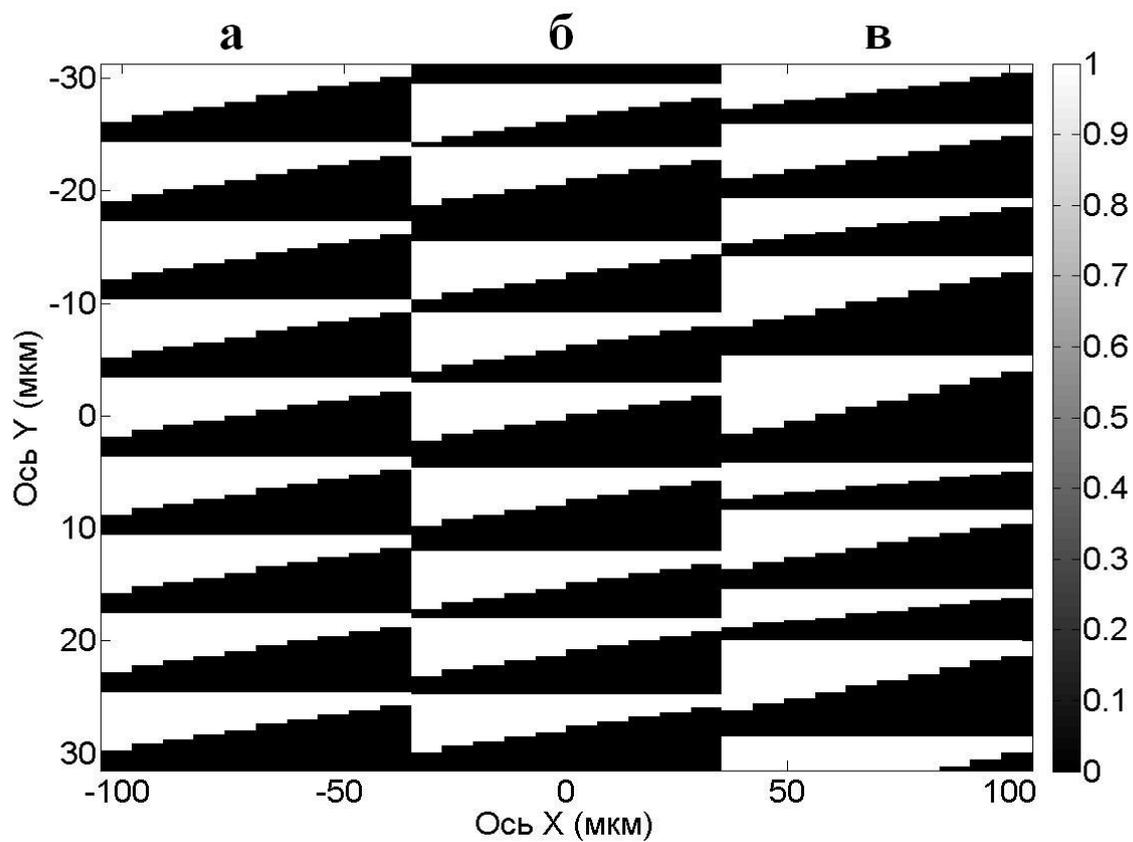


Рисунок 4: Функция пропускания растриванного фотошаблона с регулярной структурой (а), со случайно смещенными бинарными структурами (б) и со случайным изменением размера рядов ячеек (в).

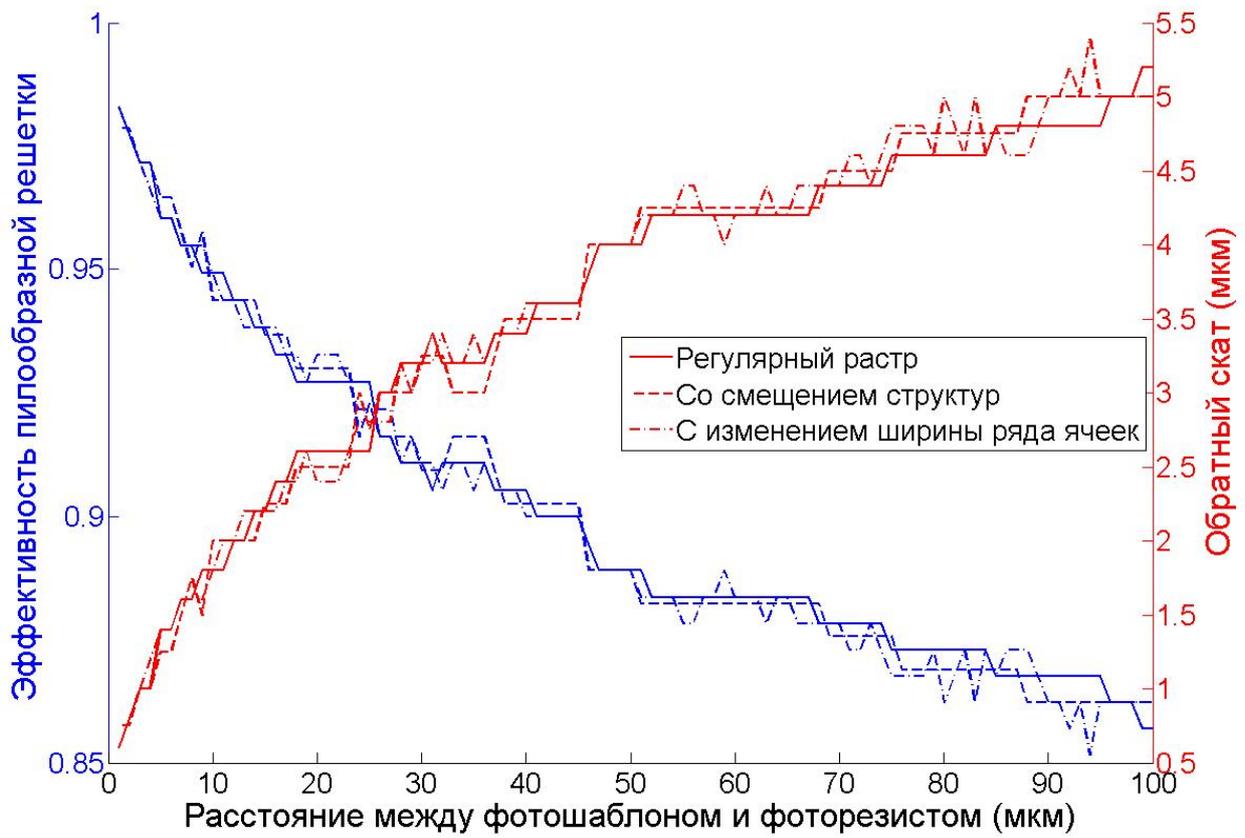


Рисунок 5: Величина обратных скатов протомоделированных пилообразных профилей и соответствующие им дифракционные эффективности пилообразного ДОЭ.

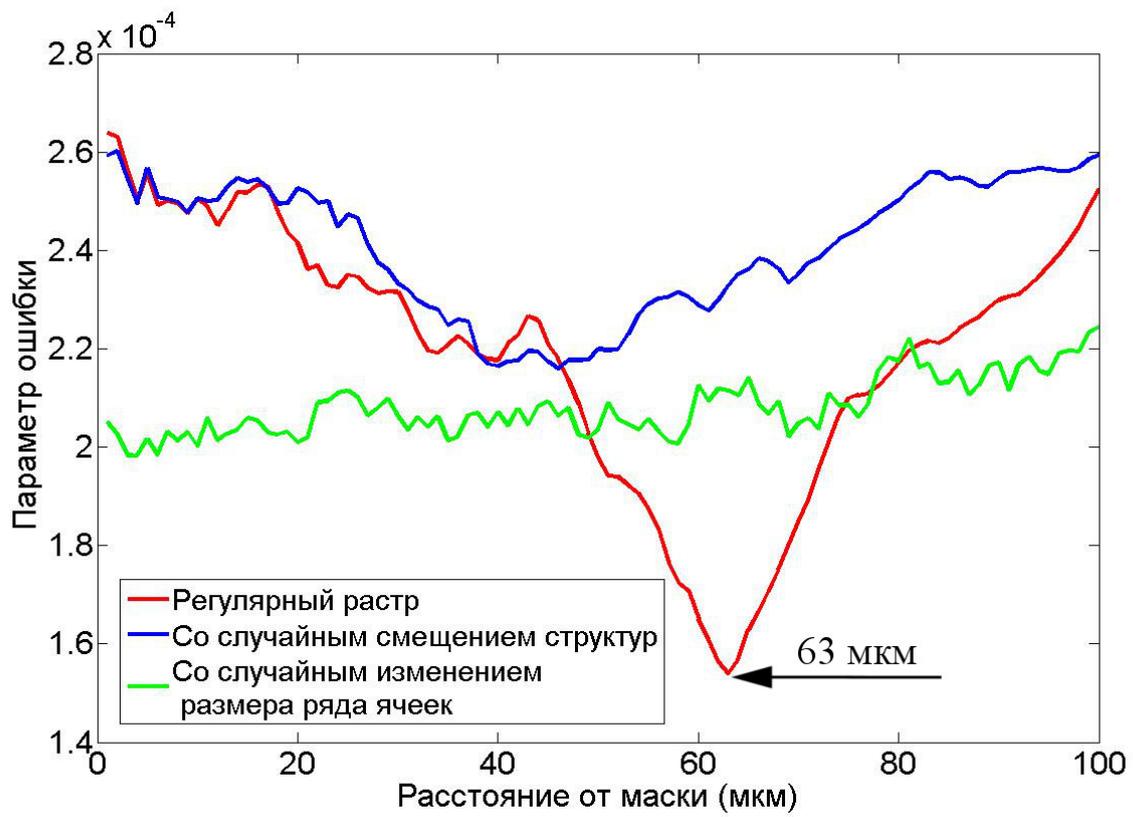


Рисунок 6: Среднеквадратическое отклонение промоделированных пилообразных профилей от пилообразных профилей. Минимум отклонения соответствует оптимальному зазору.