

# Лабораторная работа по оптической микроскопии

Московский физико-технический институт (государственный университет)

**Нехаев Александр, Семкин Валентин, Марголин Илья, Александров Михаил,  
Серягина Екатерина**

13.09.2019

## Введение

### Цель работы

- Получить четкие изображения предложенных образцов рельефных структур с максимальным увеличением. Сделать снимки с UV фильтром и без него. Проанализировать снимки, сделать вывод о достигнутом максимальном разрешении (по Рэлею) в обоих случаях.
- Получить четкие изображения тех же структур в режиме Dark Field с объективами x100, сделать снимки структур, оценить разрешение в режиме Dark Field по снимкам.
- В режиме Dark Field получить четкое изображение плоской поверхности образца с объективом x10, сделать снимок, по снимку определить число частиц загрязнения. Построить гистограмму распределения по размерам частиц.
- Получить четкое Dic изображение структуры с наименьшим разрешимым периодом, подобрать положение поляризатора для оптимального разрешения. Сделать снимок. По снимку определить разрешение, период и скважность структуры.

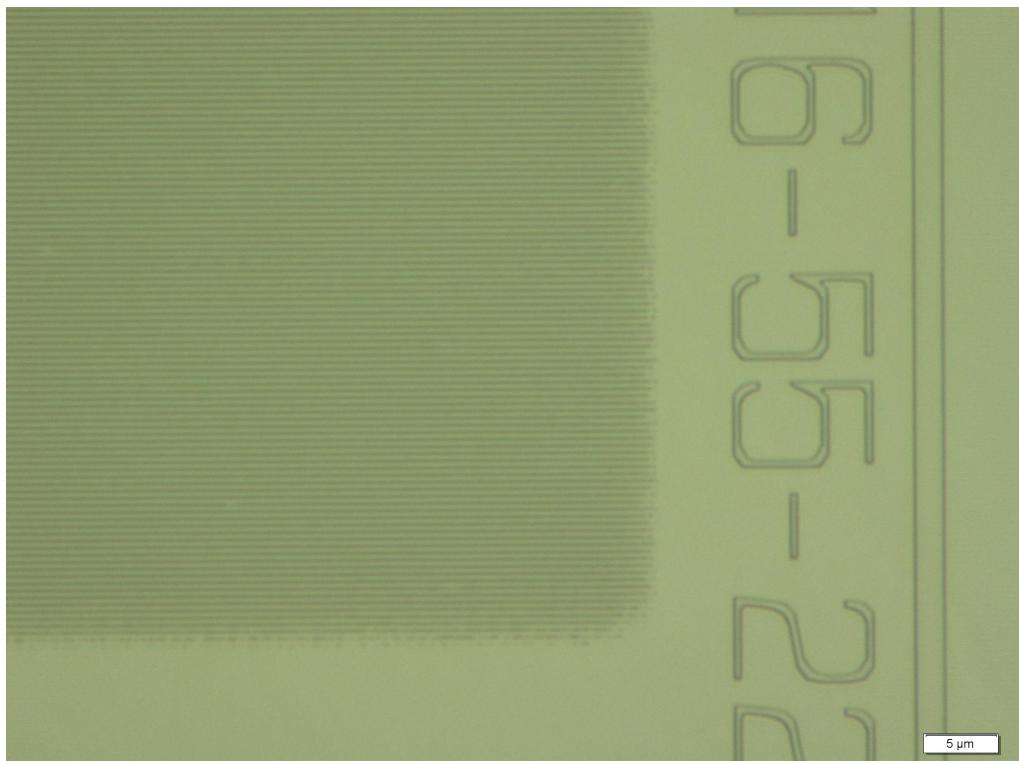
## Ход работы

Полученные изображения структур:

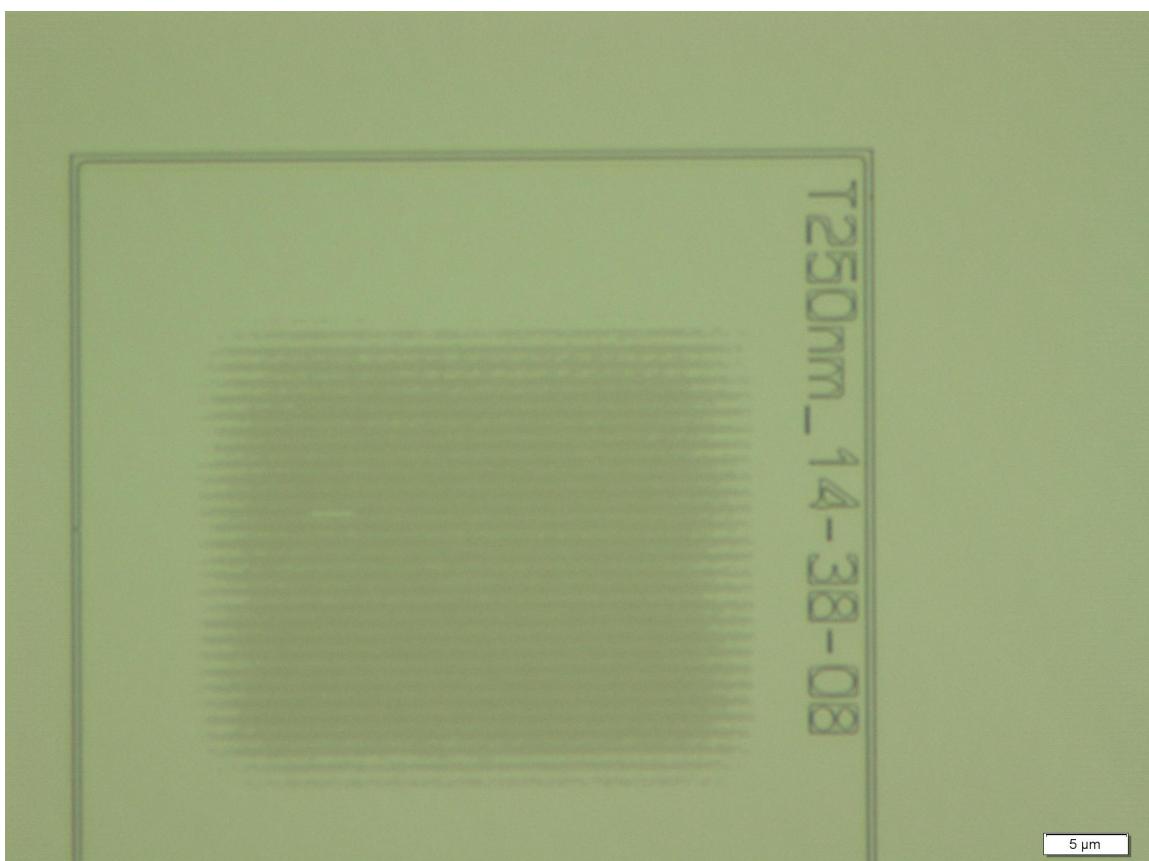
	T500 16-55-22	T250nm_14-38-08	D500 15-39-57
x100 BF without UV			
x100 BF UV			
Out[ ]=			
x100 DF			
x100 BF DIC			

### Определение максимального достигнутого разрешения по Рэлею

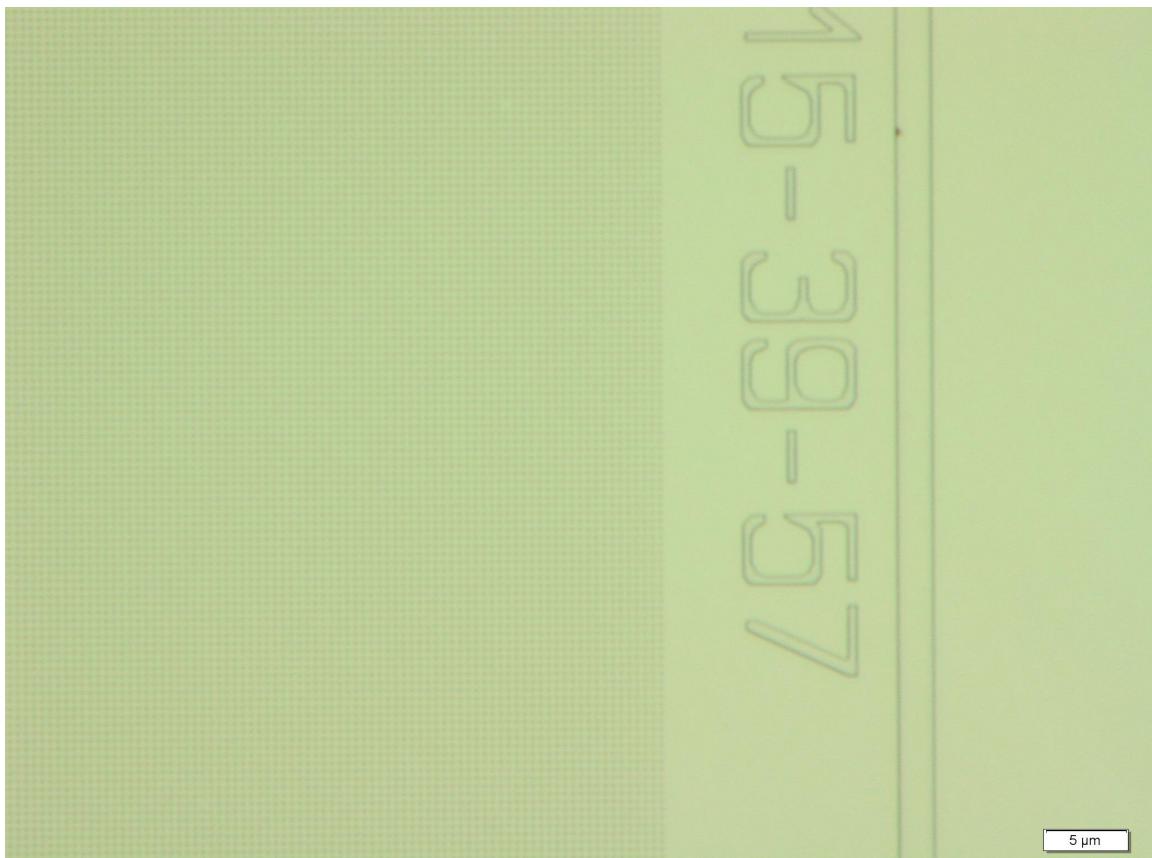
Получили изображение структур T500 16-55-22, T250nm\_14-38-08 и D500 15-39-57 на поверхности используемого образца.



Снимок структуры T500 16-55-22 в режиме светлого поля без UV фильтра

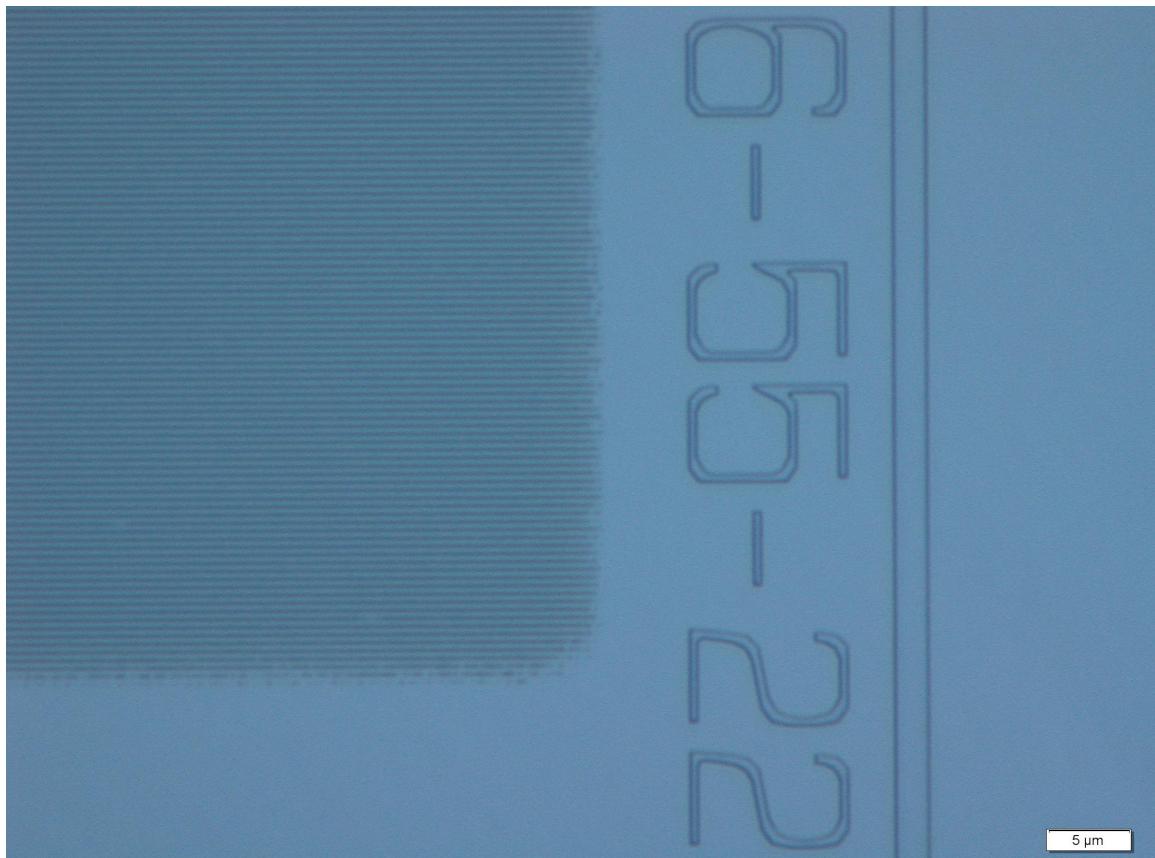


Снимок структуры T250nm\_14-38-08 в режиме светлого поля без UV фильтра

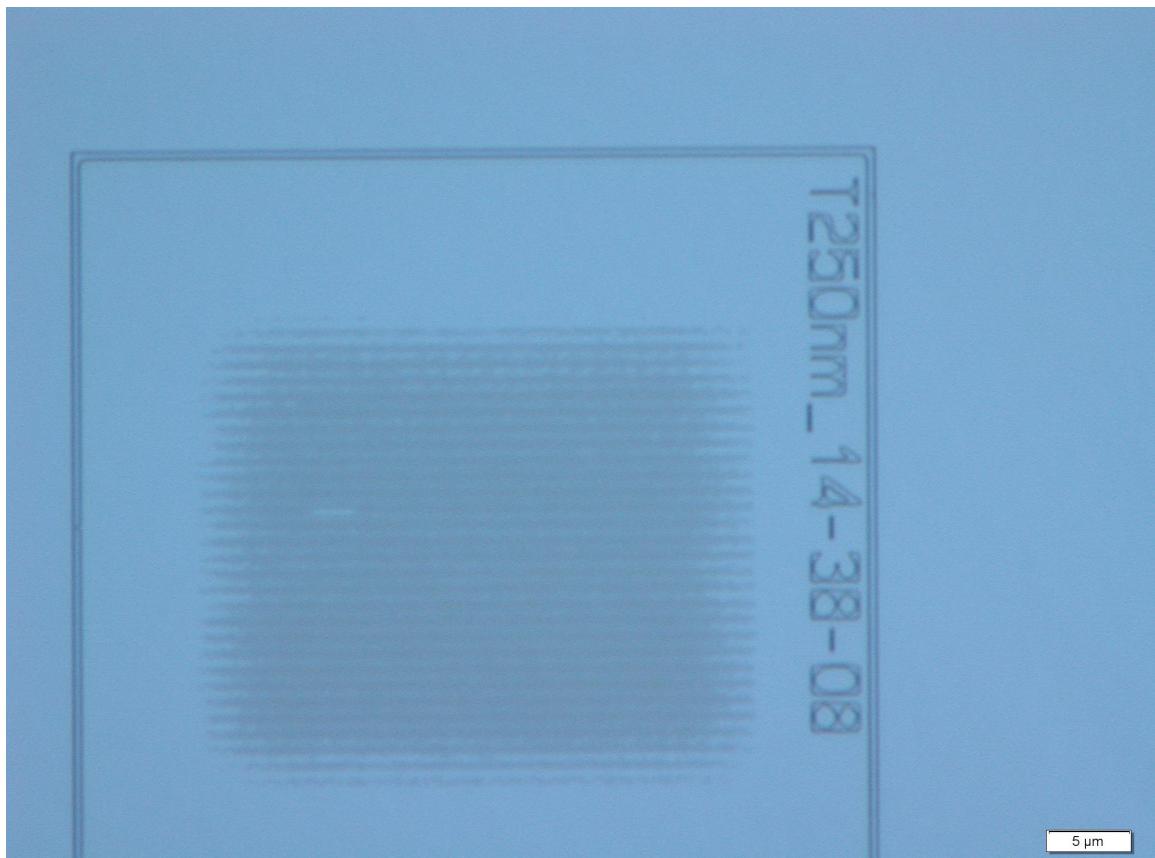


Снимок структуры D500 15-39-57 в режиме светлого поля без UV фильтра

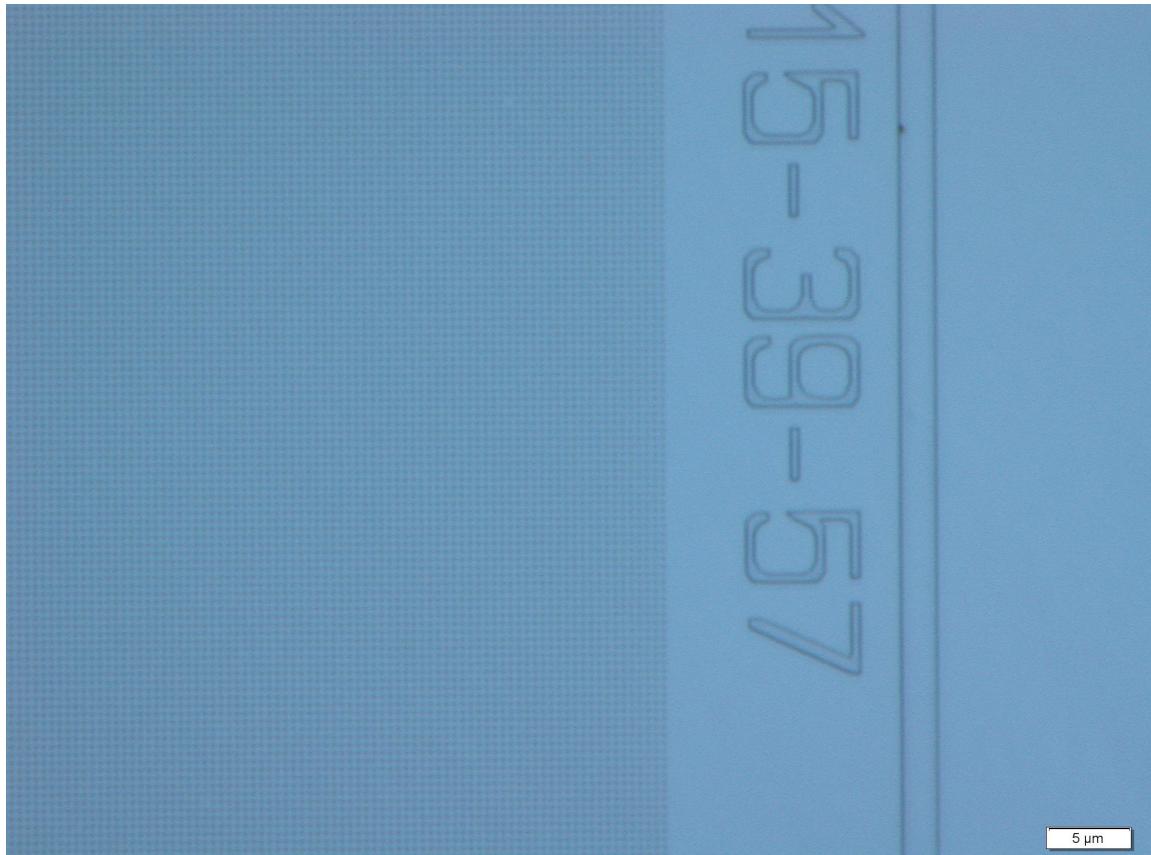
Получили изображение тех же структур, но с UV фильтром



Снимок структуры T500 16-55-22 в режиме светлого поля с UV фильтром



Снимок структуры T250nm\_14-38-08 в режиме светлого поля с UV фильтром



Снимок структуры D500 15-39-57 в режиме светлого поля с UV фильтром

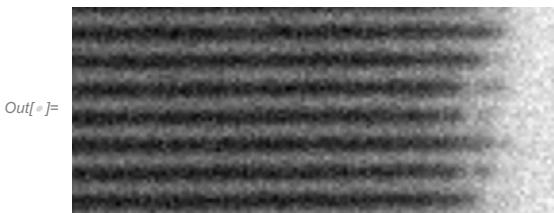
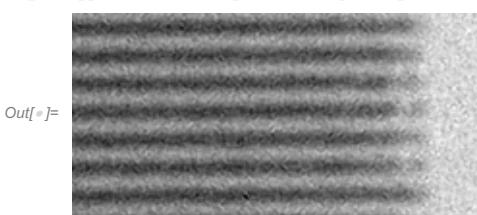
Из снимков видно, что все изображения получились разрешенными. Далее будем подробнее рассматривать структуру T500 16-55-22.

### Критерий Рэлея

*Критерий Рэлея:*

*Для того, чтобы два источника были различимы необходимо чтобы расстояние между центрами дифракционных пятен было не меньше радиуса одного пятна.*

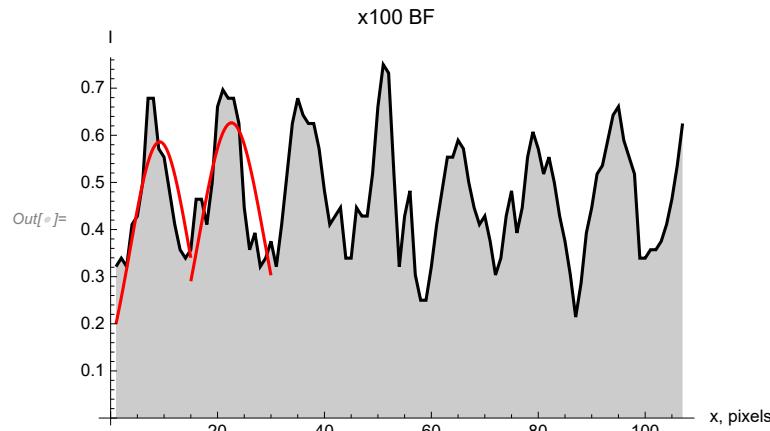
Рассмотрим фрагменты изображений с рельефными структурами



Так же введем коэффициент, для определения размеров объектов ( $\mu\text{m}/\text{pixel}$ ) исходя из размеров метки масштаба на исходном изображении:

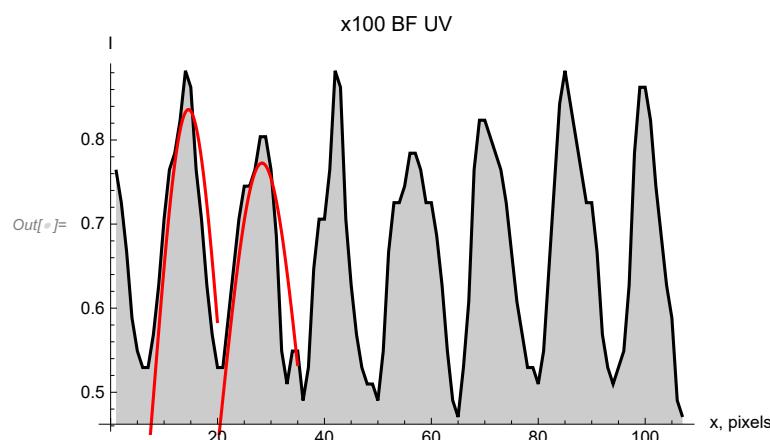
$$\text{Out}[6]= \frac{5}{146} \mu\text{m}$$

Построим срез в профиль и попытаемся аппроксимировать два соседних пика на каждом из снимков:



Правый пик:

	Estimate	Standard Error	t-Statistic	P-Value	
Правый пик:	a	0.62637	0.033735	18.5673	$9.68216 \times 10^{-11}$
	b	7.6067	0.430596	17.6655	$1.80746 \times 10^{-10}$
	c	6.13342	0.622217	9.85736	$2.12506 \times 10^{-7}$



Левый пик:

	Estimate	Standard Error	t-Statistic	P-Value	
Левый пик:	a	0.836199	0.012764	65.5121	$1.29976 \times 10^{-15}$
	b	7.55996	0.132645	56.9939	$5.99074 \times 10^{-15}$
	c	6.39494	0.232304	27.5283	$1.69703 \times 10^{-11}$

Правый пик:

	Estimate	Standard Error	t-Statistic	P-Value	
Правый пик:	a	0.772522	0.0191905	40.2554	$4.93732 \times 10^{-15}$
	b	8.32021	0.269118	30.9166	$1.4763 \times 10^{-13}$
	c	7.71753	0.495956	15.5609	$8.76968 \times 10^{-10}$

Таким образом, получаем расстояния между указанными пиками для изображения без UV-фильтра:

$$\text{Out}[9]= (0.460 \pm 0.018) \mu\text{m}$$

Для пиков на снимке без UV-фильтра получим среднюю полуширину аппроксимированных структур:

$$\text{Out}_0 = (0.472 \pm 0.031) \mu\text{m}$$

Получим аналогичное значение периода для изображения с UV-фильтром:

$$\text{Out}_0 = (0.505 \pm 0.010) \mu\text{m}$$

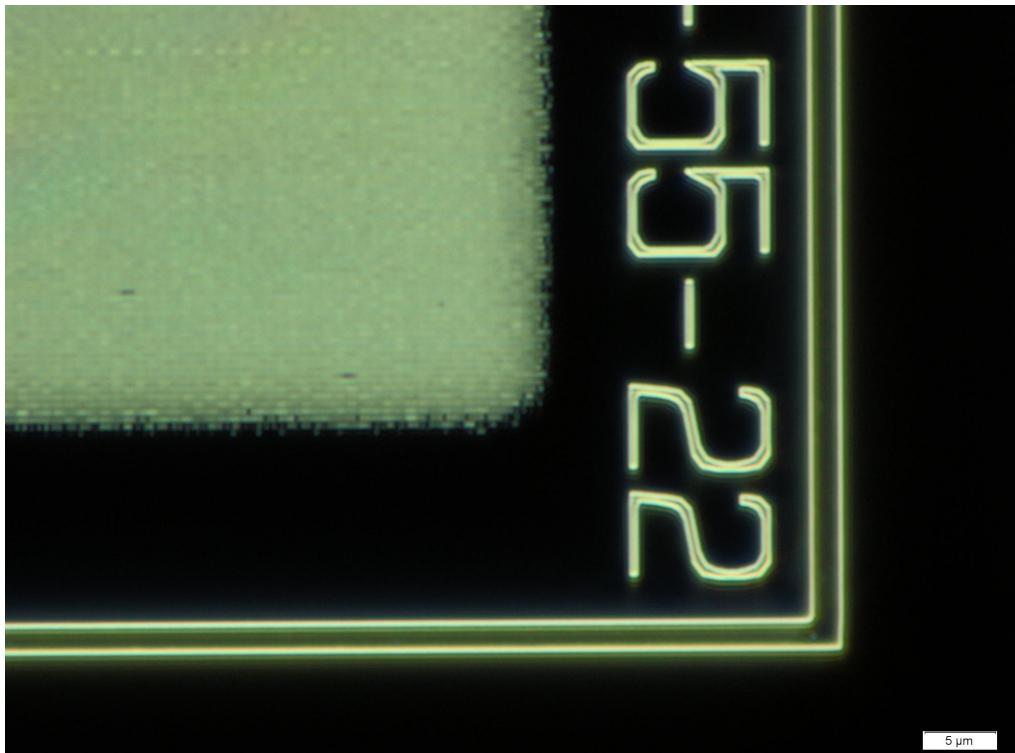
и среднее значение полуширины:

$$\text{Out}_0 = (0.569 \pm 0.022) \mu\text{m}$$

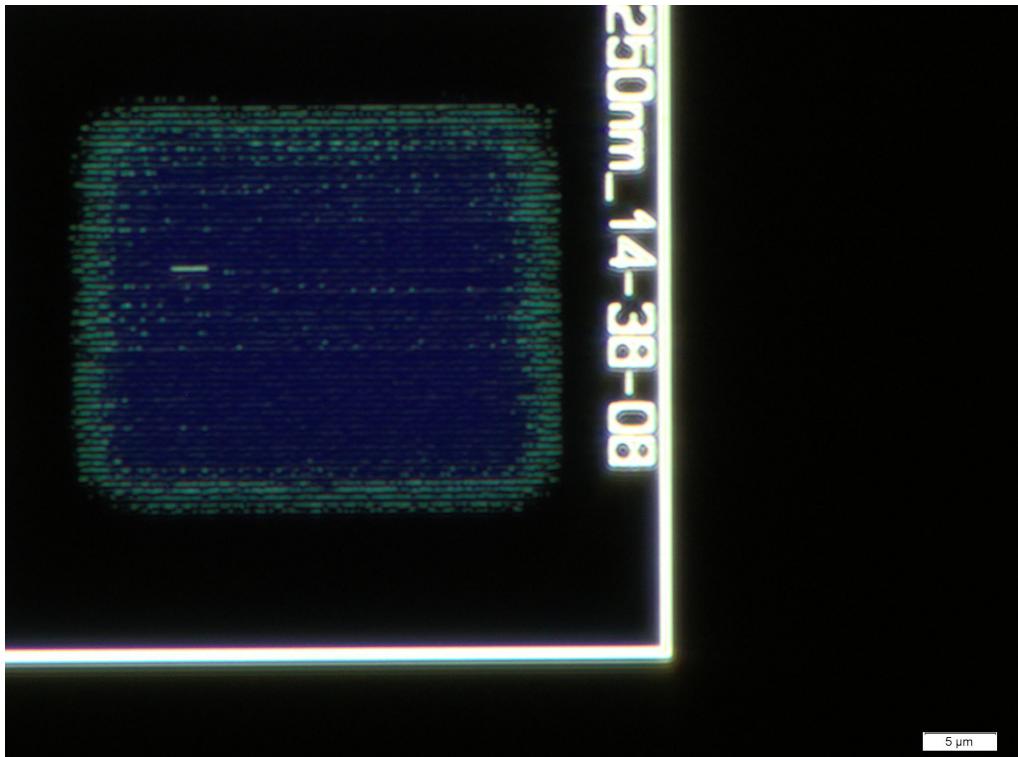
Таким образом установили, что полученные изображения действительно разрешимы и  $R_{BF} \leq (0.460 \pm 0.031) \mu\text{m}$  без UV-фильтров, а с UV-фильтром  $R_{BF\ UV} \leq (0.505 \pm 0.010) \mu\text{m}$ .

### Структуры в режиме Dark Field

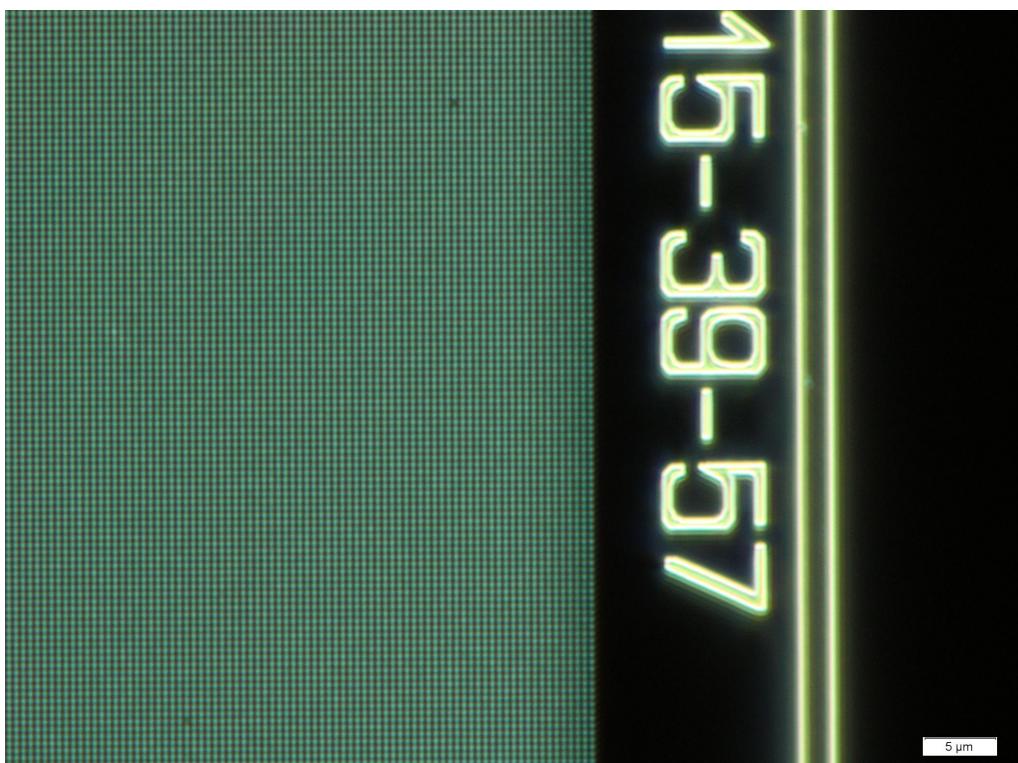
Получим четкие изображения тех же структур в режиме Dark Field с объективом x100:



Снимок структуры T500 16-55-22 в режиме темного поля



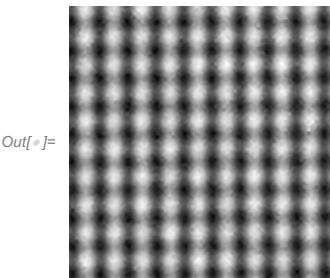
Снимок структуры T250nm\_14-38-08 в режиме темного поля



Снимок структуры D500 15-39-57 в режиме темного поля

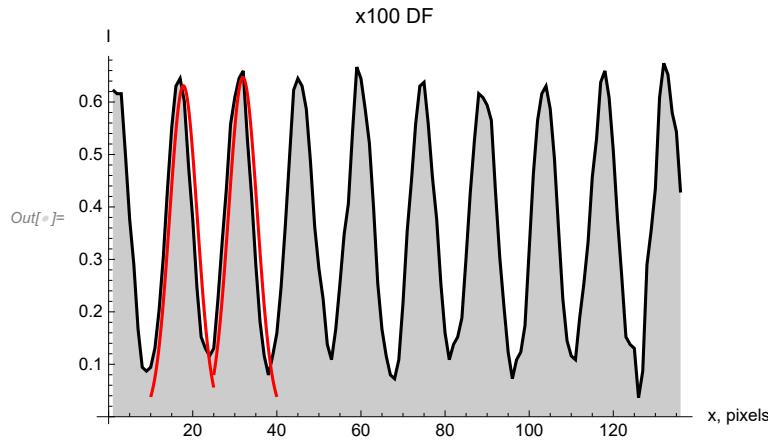
Из снимков видно, что разрешима только одна структура - D500 15-39-57, которую далее и будем рассматривать.

Выделим рассматриваемый фрагмент:



Out[6]=

Как и в предыдущем разделе получим параметры пиков на снимке:



		Estimate	Standard Error	t-Statistic	P-Value
Левый пик:	a	0.63101	0.0195445	32.2858	$8.4614 \times 10^{-14}$
	b	7.78117	0.116994	66.5093	$7.44822 \times 10^{-18}$
	c	-3.27623	0.119859	-27.334	$7.15597 \times 10^{-13}$
Правый пик:	a	0.646783	0.0245261	26.3712	$1.13177 \times 10^{-12}$
	b	6.93087	0.148821	46.5719	$7.51443 \times 10^{-16}$
	c	3.38576	0.156621	21.6175	$1.42064 \times 10^{-11}$

Введем масштабирующий коэффициент ( $\mu\text{m}/\text{pixel}$ )

$$\text{Out[6]}= \frac{5}{146} \mu\text{m}$$

Оценим по снимку период структур

$$\text{Out[6]}= (0.485 \pm 0.006) \mu\text{m}$$

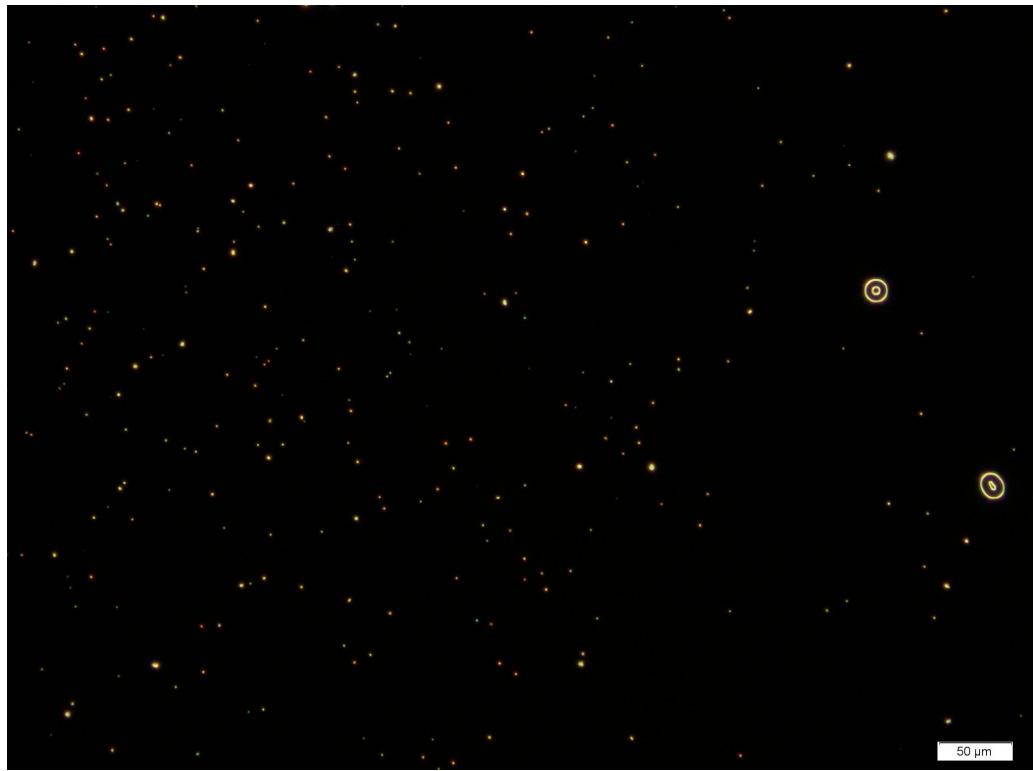
Аналогично оценим полуширину аппроксимированной структуры:

$$\text{Out[6]}= (0.269 \pm 0.008) \mu\text{m}$$

Установили, что разрешение для микроскопа в режиме черного поля составляет около  $(0.485 \pm 0.006) \mu\text{m}$ .

### Гистограмма распределения по размерам частиц загрязнения

Получили изображение загрязненной части образца:

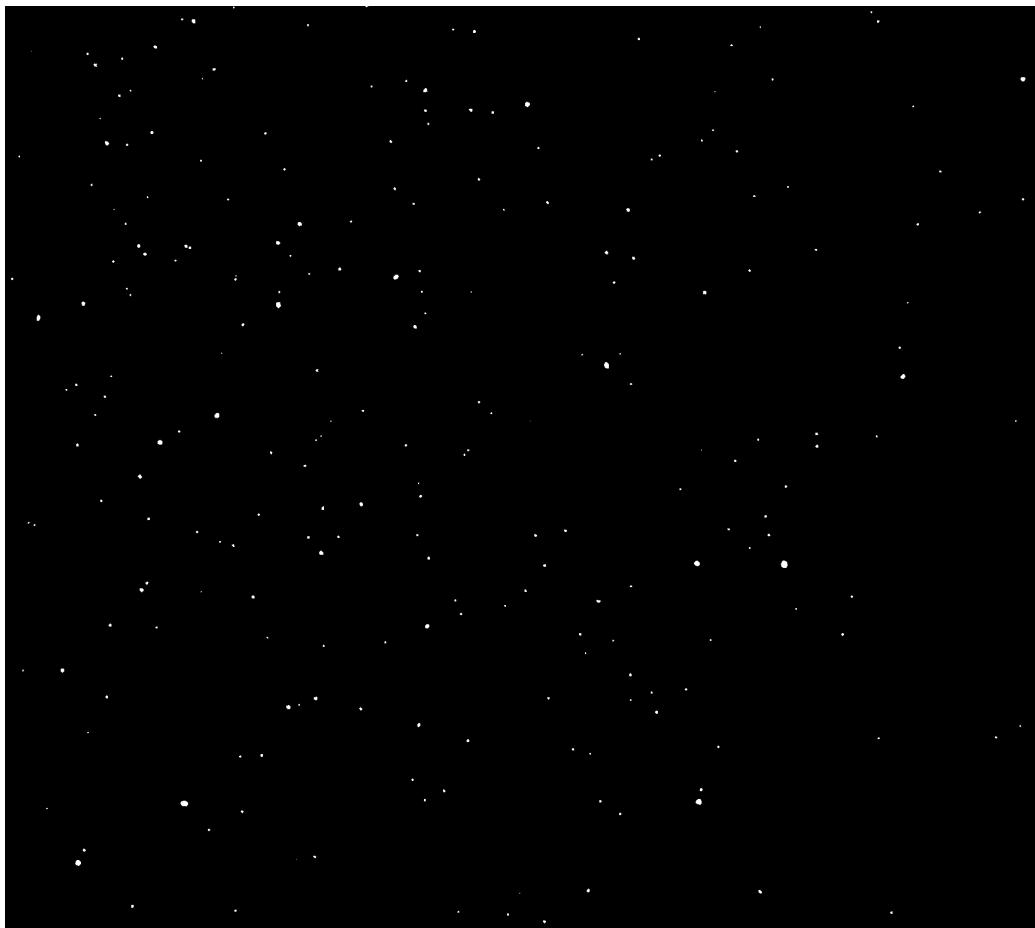


Снимок частиц загрязнения в режиме темного поля

Установим размер масштабирующего изображения

$$Out[=]= \frac{25}{73} \mu\text{m}$$

Преобразуем изображение в черно-белое и обрежем ненужные фрагменты



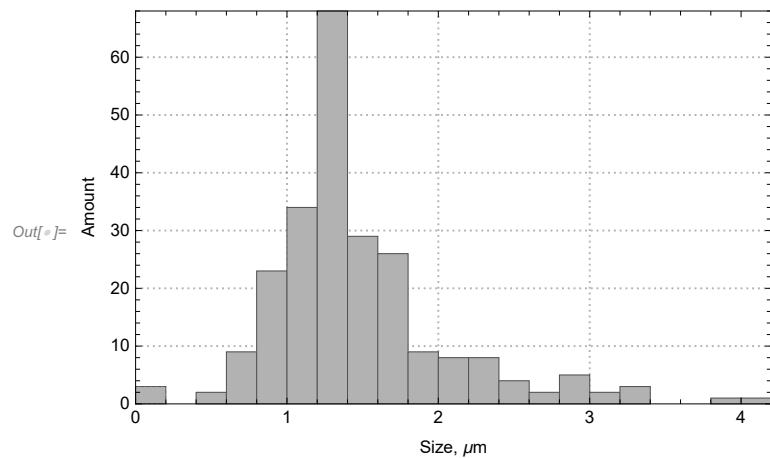
Out[6]=

Составим таблицу с описанием параметров (изображение, длина, ширина и площадь эллипса, которым производится аппроксимация пятна).

	Image	Length	Width	Area
1		4.99393	1.77266	7.25
2		3.02372	2.79942	7.25
3		3.4641	2.73861	8.125
4		4.09878	2.99333	10.25
5		7.64668	6.12603	37.5
6		4.6188	4.02658	15.125
7		4.09878	2.99333	10.25
8		3.09839	1.78885	5.125
9		3.88575	2.79544	9.375
10		5.31663	4.99216	21.375
11		4.31867	3.67946	13.375
12		4.09878	2.99333	10.25
13		6.5325	4.61203	24.5
14		0.5	0.5	1.0
15		3.82971	3.82971	12.5
16		4.0	3.46887	11.5
17		6.39262	5.20373	25.125
18		5.5447	4.2957	19.125
19		8.16815	7.33233	47.75
20		3.23607	1.23607	4.25

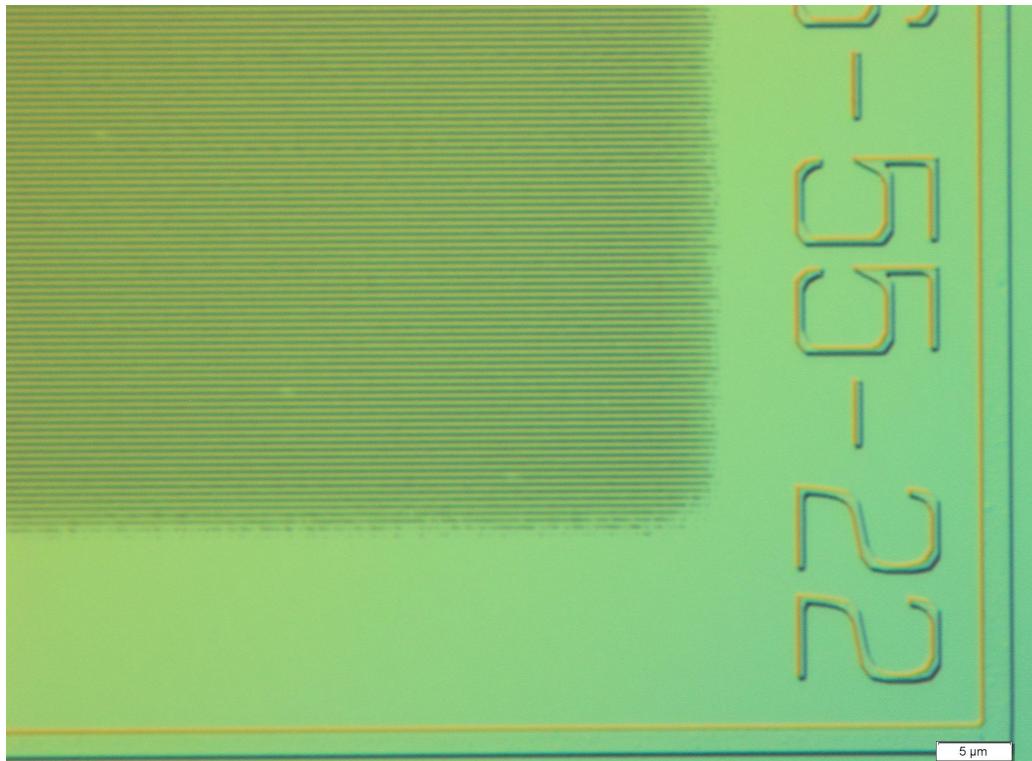
◀ < showing 1–20 of 237 > ▶

По заданной таблице построим гистограмму с учетом масштабирующего коэффициента:

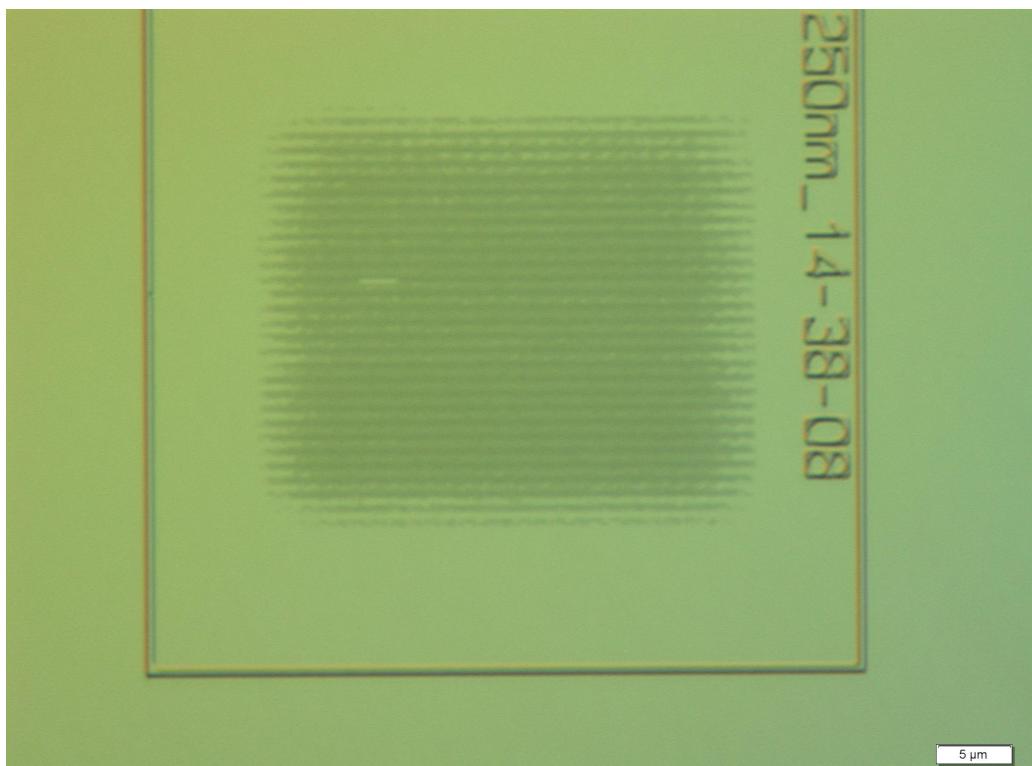


## Определение разрешения, периода и скважности структуры по DIC изображению

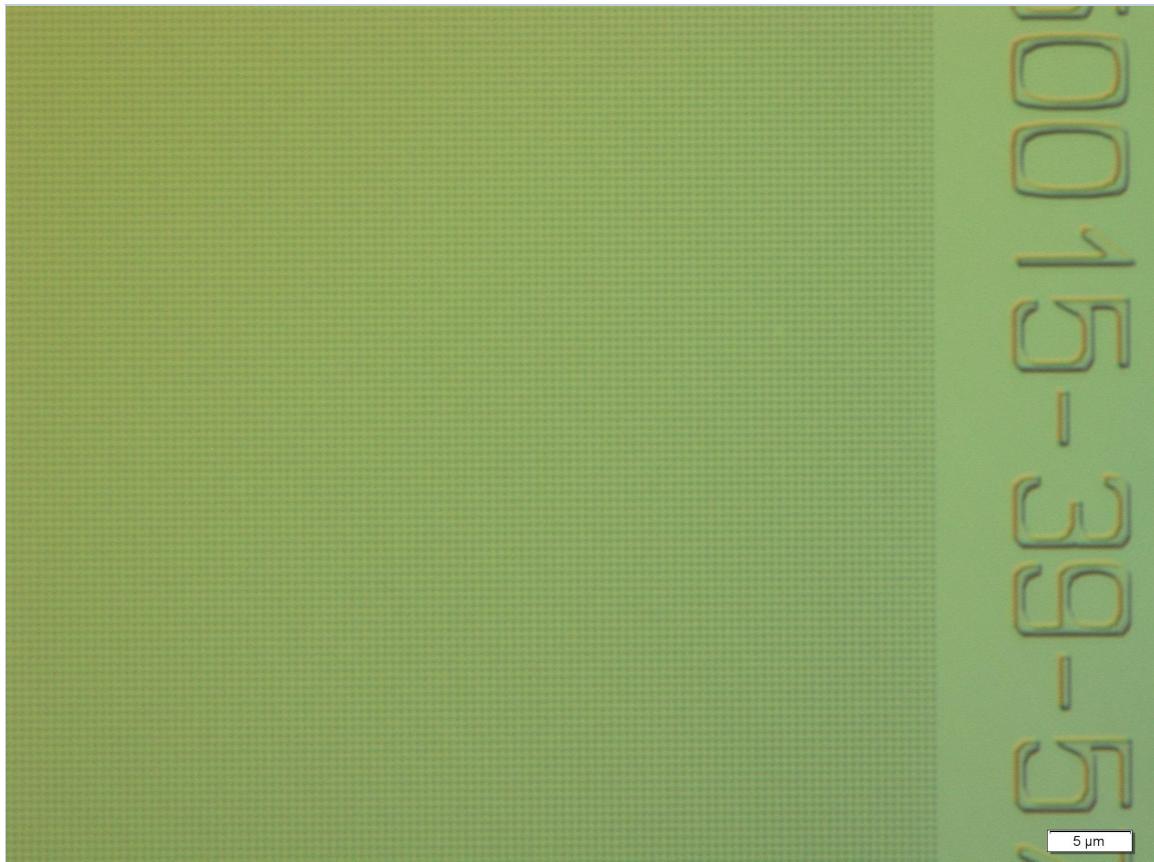
Получили DIC изображения структур:



DIC снимок структуры T500 16-55-22



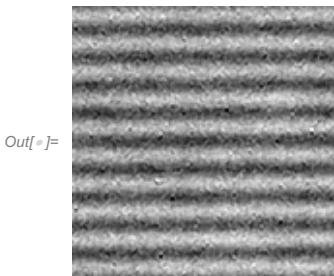
DIC снимок структуры T250nm\_14-38-08



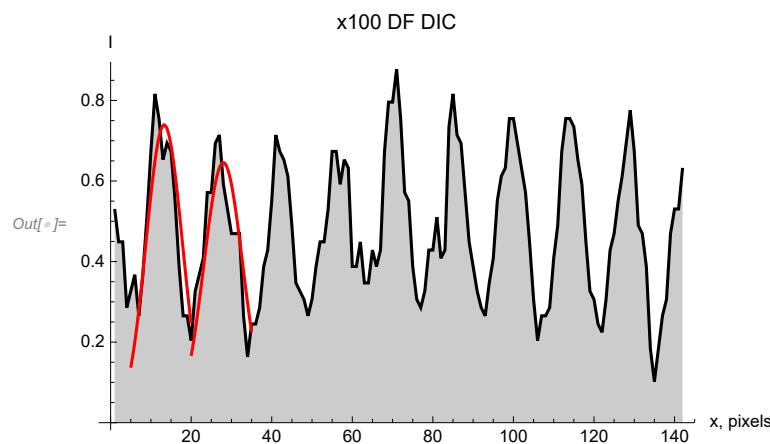
DIC снимок структуры D500 15-39-57

Далее будем рассматривать структуру Т500 16-55-22.

Увеличим рассматриваемый фрагмент



Построим и срез и аппроксимируем два соседних пика.



		Estimate	Standard Error	t-Statistic	P-Value
Левый пик:	a	0.738768	0.0350608	21.0711	$1.96465 \times 10^{-11}$
	b	8.30155	0.249766	33.2373	$5.82494 \times 10^{-14}$
	c	4.51717	0.289976	15.5778	$8.65304 \times 10^{-10}$
Правый пик:	a	0.64558	0.0257291	25.0915	$2.13583 \times 10^{-12}$
	b	7.97432	0.228113	34.9577	$3.04314 \times 10^{-14}$
	c	-4.83696	0.277053	-17.4586	$2.09445 \times 10^{-10}$

Коэффициент масштабирования:

$$\text{Out}[6] = \frac{5}{146} \mu\text{m}$$

Оценим по снимку период структур:

$$\text{Out}[7] = (0.502 \pm 0.012) \mu\text{m}$$

Аналогично оценим полуширину аппроксимированной структуры:

$$\text{Out}[8] = (0.377 \pm 0.016) \mu\text{m}$$

Установили, что разрешение для микроскопа в режиме черного поля составляет около  $(0.502 \pm 0.012) \mu\text{m}$ .

Определим скважность структуры согласно формуле

$$S = \frac{T}{\tau}$$

где  $T$  - период структур,  $\tau$  - ширина отдельного пика. В результате:

$$\text{Out}[9] = 1.33 \pm 0.06$$

## Выводы

- В режиме светлого поля различимы все структуры, однако с UV-фильтром разрешение незначительно уменьшается.
- В режиме темного поля различима только одна из структур, однако с его помощью можно обнаружить частицы загрязнения.
- Режим DIC так же позволяет разрешить все структуры.
- Для режима DIC получили значение скважности:  $S = 1.33 \pm 0.06$ .
- Получили гистограмму размеров частиц загрязнения.