




**“Утверждаю”**


Генеральный директор  
Фонда Развития Новых Медицинских  
Технологий  
“Айрэс”

 В.А. Осипов



**“Утверждаю”**

Генеральный директор ГУП ВНИИ  
“Государственный Оптический Институт  
им. академика С.И. Вавилова”  
академик РАН

 Г.С. Петровский



**ОТЧЕТ № 2**

**“Теоретические и экспериментальные исследования дифракционных и поляроидных свойств оптических транспарантов и матриц ФРНМТ “Айрэс” с фрактальным рисунком на фотошаблонах”.**

Шифр НИР - “Фотошаблон”

**“Согласовано”**

Генеральный директор АООТ  
“ТКС ОПТИКА”, к.т.н.

 Е.А. Иозеп

начальник проблемной лаборатории  
фрактальной оптики:

 Г.С. Мельников

**Г. Санкт-Петербург**

2001 г.

## 2.4.1. Математическая модель построения графически синтезированных голограмм Фонда «Айрэс».

Методы пространственно-временной фильтрации в оптике были предложены более 100 лет назад Эрнстом Аббе.[1] Современные исследования комплексной пространственной фильтрации с помощью бинарных масок [2], привели к созданию целого научного направления компьютерно-генерируемых голограмм (CGH, в настоящее время написано более 200 научных работ по новому направлению). Ряд научных исследований посвящен методам создания генераторов растровых осей с помощью компьютерных голограмм (multiple Hough transform slices, HT CGH) [3].

Во всех современных публикациях отмеченные явления объясняются комплекснозначными уравнениями пространственных частот написанных в общем виде, а для точек  $(x, y)$  в формируемых транспарантами изображениях или дифракционных узорах (patterns) отыскиваются условия соответствия

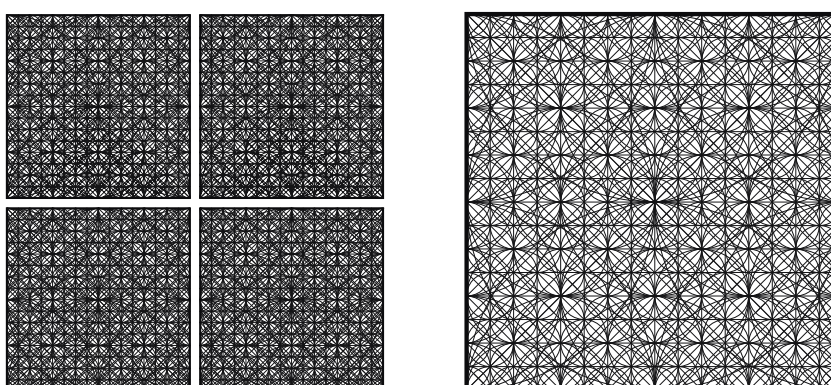
$$-\frac{q}{2} \leq \frac{x}{T} + \frac{\phi(x, y)}{2\pi} + n \leq \frac{q}{2} \quad (2.72)$$

где  $q$  — константа, определяющая ширину интерференционной полосы  
 $T$  — период дифракционной решетки  
 $\phi(x, y)$  — функция фазовых вариаций волнового фронта  
 $n$  — целое число

Этот теоретический подход удовлетворительно объясняет явления, формируемые графическими транспарантами с регулярной сеткой (матрицей) решеток называемых дифракционными. Однако, применяется он к пространственным периодам в сотни и тысячи раз превышающим длину волны когерентного излучения, пропускаемого транспарантами.

В случае если периоды таких решеток  $T$  на порядки превышают длину волны светового излучения, и, тем не менее, формируют упорядоченные растры лучей, эти явления принято относить к явлениям дифракции на краю темнопольных полос. Надежного математического описания этих явлений, по существу, нет.

К тому же, этот теоретический аппарат неприменим к графическим транспарантам с геометрическим строго иерархичным фрактальным рисунком высокой плотности, типа приведенного на Рис 2.10.



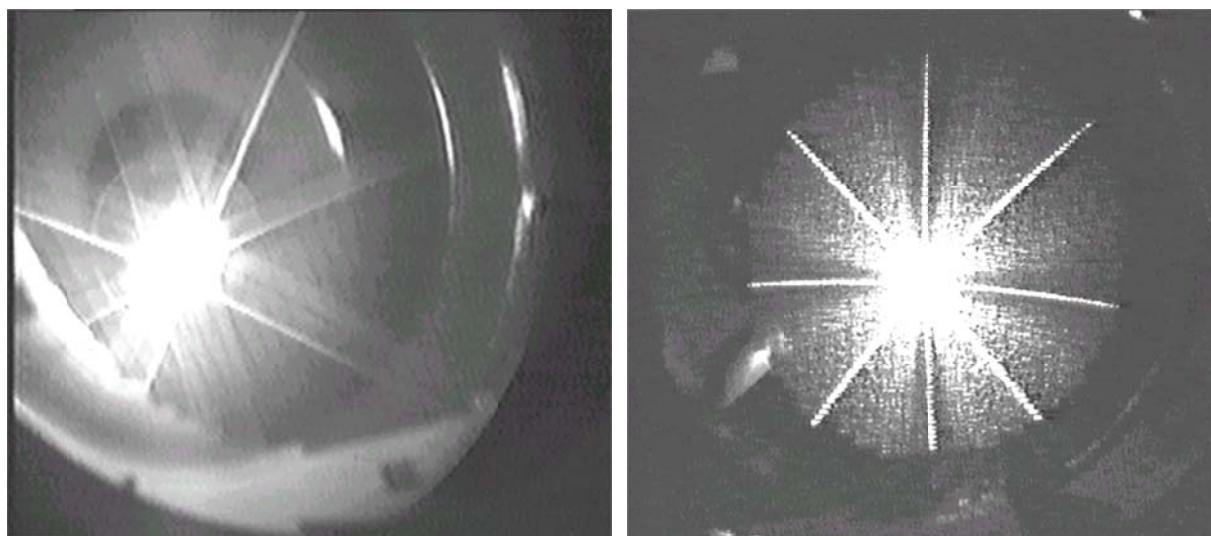
а) Фрагмент матрицы

б) Рисунок элемента матрицы

**Рис.2.10.** Матрица транспарантов с фрактальным рисунком высокой плотности.

Однако, приведенные на Рис. 2.10 транспаранты создают как голографические изображения растровых осей в широком спектре частот (Рис. 2.11а), так и являются формирователями multiple Hough transform slices-эффектов (Рис. 2.11 б). Факт формирования этих оптических явлений матричными топологиями, технологически разработанными и изготовленными по ТЗ ФРНМТ "AIRES", был экспериментально

установлен как в работе транспарантов на пропускание, так и на отражение когерентного и некогерентного света [43].

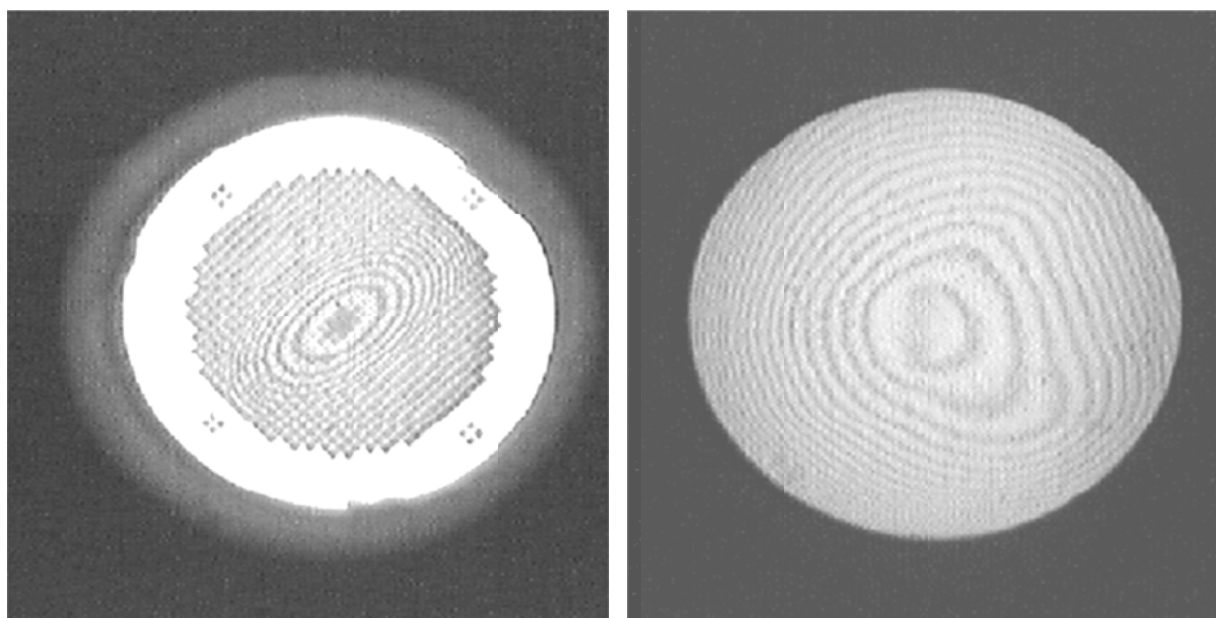


а)

б)

Рис. 2.11 Формирование матриц транспарантов multiple Hough transform slices-эффектов

Интерференционные исследования, кроме того показали, что графические фрактальные рисунки высокой плотности на транспарантах, работающих на отражение когерентного излучения, обладают оптической светосилой (см. рис. 2.12).



а) От матрицы транспарантов

б) От фотошаблонов

Рис. 2.12. Интерференционные изображения от транспарантов с фрактальным рисунком высокой плотности работающих на отражение.

Подготовленные по результатам экспериментальных исследований совместная публикация [40] позволяют утверждать, что для описания зафиксированных оптических явлений и ряда обнаруженных явлений Фрактальной оптики [38,39] наиболее приемлема новая математическая модель описания гармонических процессов (как пространственных, так и частотных) методами геометрического поля пространственных частот [43].

## **2.6. Экспериментальные исследования фотошаблонов и транспарантов фонда «Айрэс» с фазовым рисунком на стекле**

### **2.6.1. Исследование геометрических размеров элементов матриц**

Существуют разнообразные методы измерения геометрических размеров нано- и суб-нано-размерных элементов, сформированных на поверхности проводящих и диэлектрических подложек. Для определения высоты, ширины и формы ступенек, линий, выступов (дорожек) и канавок (впадин, лунок) используются просвечивающие и растровые электронные микроскопы; атомно-силовые, туннельные электронные и ближнепольные оптические микроскопы; светооптические микроинтерферометры; амплитудно- и фазово-контрастные световые микроскопы.

На данном этапе исследований матричных транспарантов было решено использовать метод светооптической микроинтерферометрии, исходя из широкого набора структур, содержащихся в матрицах, изготовленных различными методами. В этом случае упрощается сравнительный анализ исследуемых структур, так как возможно одновременное наблюдение увеличенного изображения и измерение высоты линий и глубины канавок.

Схема и принцип действия интерференционного микроскопа в свое время были предложены выдающимся ученым Оптического института академиком В.П.Линником и применены для исследования качества обработки поверхностей и измерения высоты неровностей в диапазоне 0,03 - 1 мкм

Действие микроскопа основано на явлении интерференции света. Для получения двух систем волн, способных интерферировать, используется разделением пучка лучей, исходящих из одной точки источника света, на два пучка. В качестве разделяющей системы используется наклонная плоскопараллельная пластинка, имеющая полупрозрачное светоделительное покрытие. Половину падающего света пластинка отражает, половину пропускает, вследствие чего образуются две системы волн, способных интерферировать. Опорный плоский волновой фронт отражается от глухого опорного зеркала, а объектный волновой фронт представляет собой отраженный от поверхности исследуемого образца свет, несущий информацию о геометрической структуре поверхности, которая зашифрована в его локальном изменении длины оптического пути или фазы.

В результате интерференции этих двух систем волн в фокальной плоскости окуляра наблюдаются интерференционные полосы. В точках поля, где разность хода равна:  $\lambda$ ,  $2\lambda$ ,  $3\lambda$ , и т.д., в результате интерференции получаются светлые полосы, а в точках, где разность хода равна:  $\lambda/2$ ,  $3\lambda/2$ ,  $5\lambda/2$  и т.д. - темные полосы.

В поле зрения микроинтерферометра видны одновременно исследуемая поверхность и интерференционные полосы. На исследуемой поверхности в местах выступов или впадин интерференционные полосы искривляются. Величина искривления полос характеризует размер неровности поверхности и измеряется винтовым окулярным микрометром.

Увеличение микроскопа при визуальном наблюдении с винтовым окулярным микрометром и симметричным окуляром равно 490 X. Столик микроскопа имеет координатное перемещение в двух взаимно-перпендикулярных направлениях ( по 10 мм каждое) и вращение на 360<sup>0</sup>. Цена деления барабана микрометрических винтов - 0,005 мм. Микроскоп позволяет вести наблюдение в обычном и монохроматическом свете. Монохроматический свет получается путем установки в осветитель зеленого интерференционного светофильтра.

В белом свете интерференционная картина имеет следующий вид: в центре наблюдается белая ахроматическая полоса, по обеим сторонам которой расположены две черные полосы с цветными каймами, и дальше по 3 - 4 цветные полосы с каждой стороны.

Переход от одной светлой (или темной) полосы к другой светлой (или темной) полосе соответствует изменению разности хода между интерферирующими лучами на одну длину волны. Если на исследуемой поверхности имеется выступ или впадина величиной равной  $\lambda/2$ , то в этом месте интерференционные полосы сместятся на один интервал между полосами. Зная длину волны света, можно получить величину неровности в микронах. Так, например, глубина неровности на поверхности в 0,275 микрона вызовет в поле зрения прибора искривление полосы на величину всего интервала между полосами, т.е. "на одну полосу". При использовании света с  $\lambda = 0,53$  мкм наименьшая неровность, которая может быть измерена на микроинтерферометре, составляет 0,0265 мкм.

Определение величины неровности производится тремя операциями:

- 1) измерение величины интервала между полосами,
- 2) измерение величины изгиба полос,
- 3) вычисление высоты неровности.

При работе в белом свете искривление в одну интерференционную полосу соответствует высоте неровности на исследуемой поверхности, равной 0,275 микрона. Тогда измеренная высота неровности  $t$  вычисляется по формуле:

$$t = 0,275n(N_3 - N_4) / (N_1 - N_2) , \quad (2.98)$$

где:  $t$  - высота неровностей /мкм/,

$N_1$  - первый отсчет при измерении интервала

$N_2$  - второй отсчет при измерении интервала,

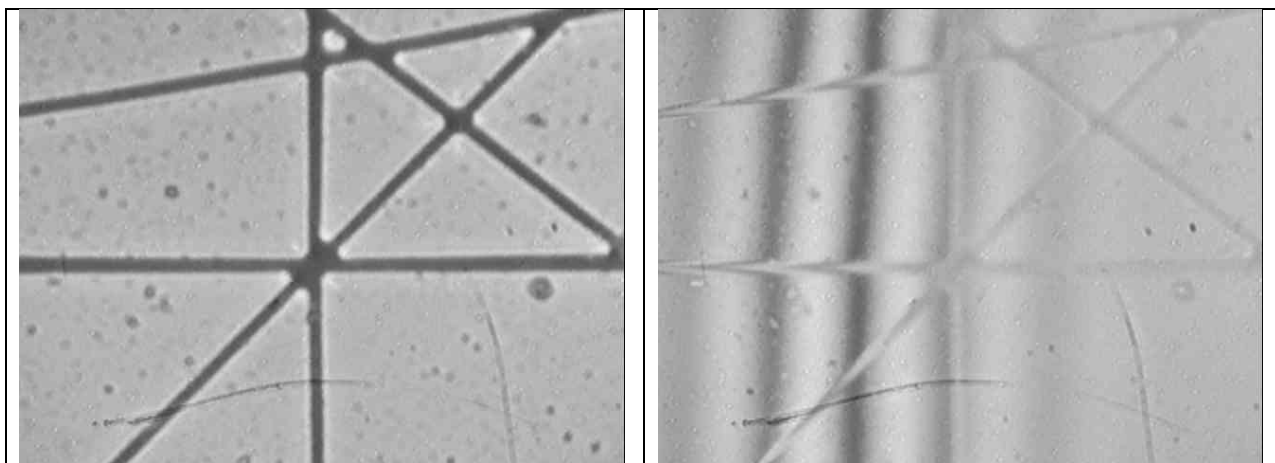
$N_3$  - первый отсчет при измерении изгиба полосы,

$N_4$  - второй отсчет при измерении изгиба полосы,

$n$  - число интервалов между полосами.

Образец № 1. Представляет собой тонкие линии (выступы) конической формы, сформированные на поверхности стеклянной пластины.

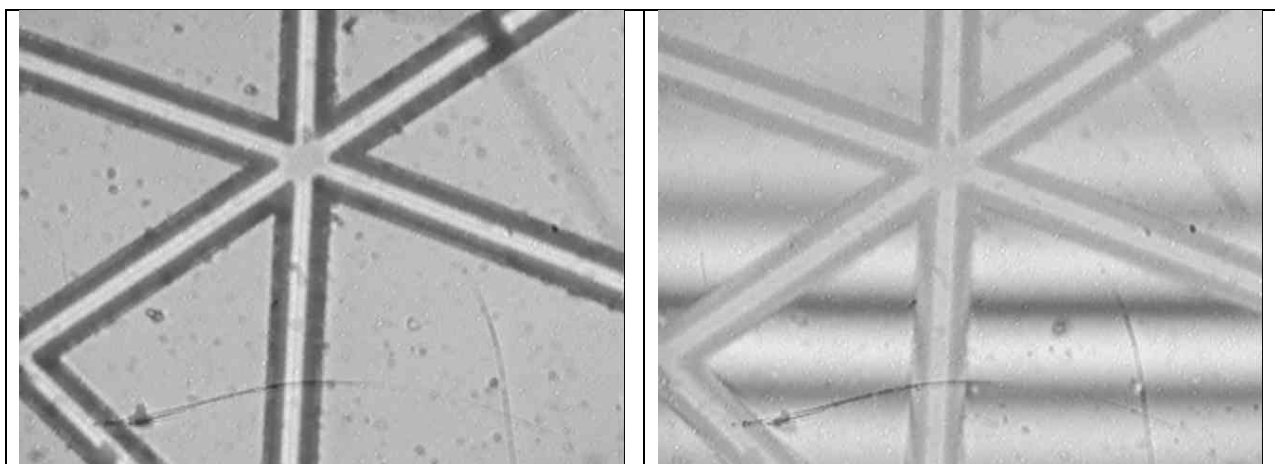
Усредненная высота линий рисунка равна 0,5 мкм, ширина линий у основания 0,5- 0.6 мкм.



На рисунке 2.28 представлен вид поля зрения микроинтерферометра в режиме наблюдения интерференции с образцом № 1.

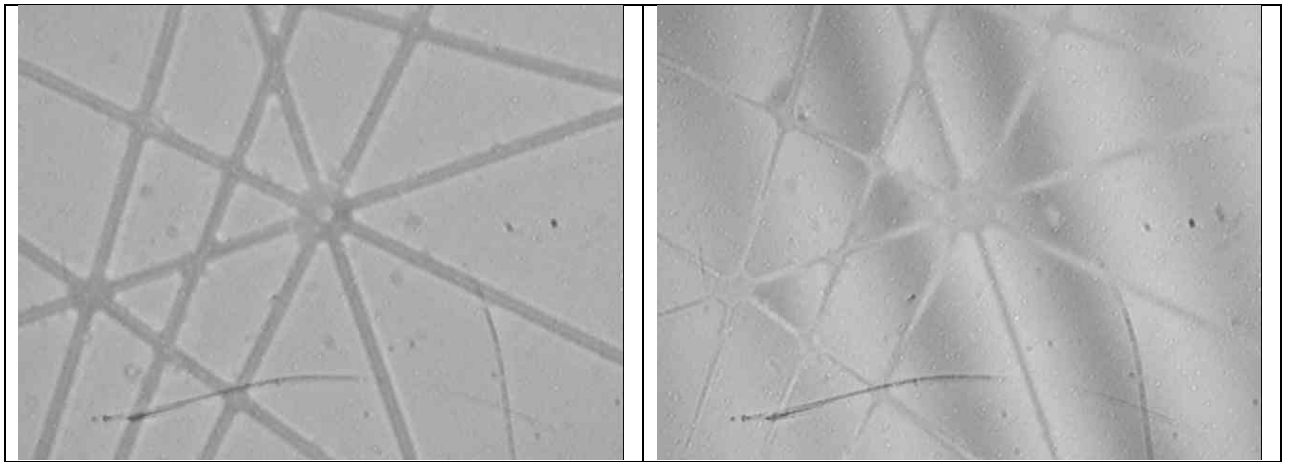
Образец № 2. Визуально представляет собой тонкие линии (канавки), сформированные на поверхности стеклянной пластины. Канавки имеют трапециидальную форму. Ширина канавки на поверхности равна 15 мкм, в глубине - 7,5 мкм.

Усредненная глубина канавки равна 5 мкм



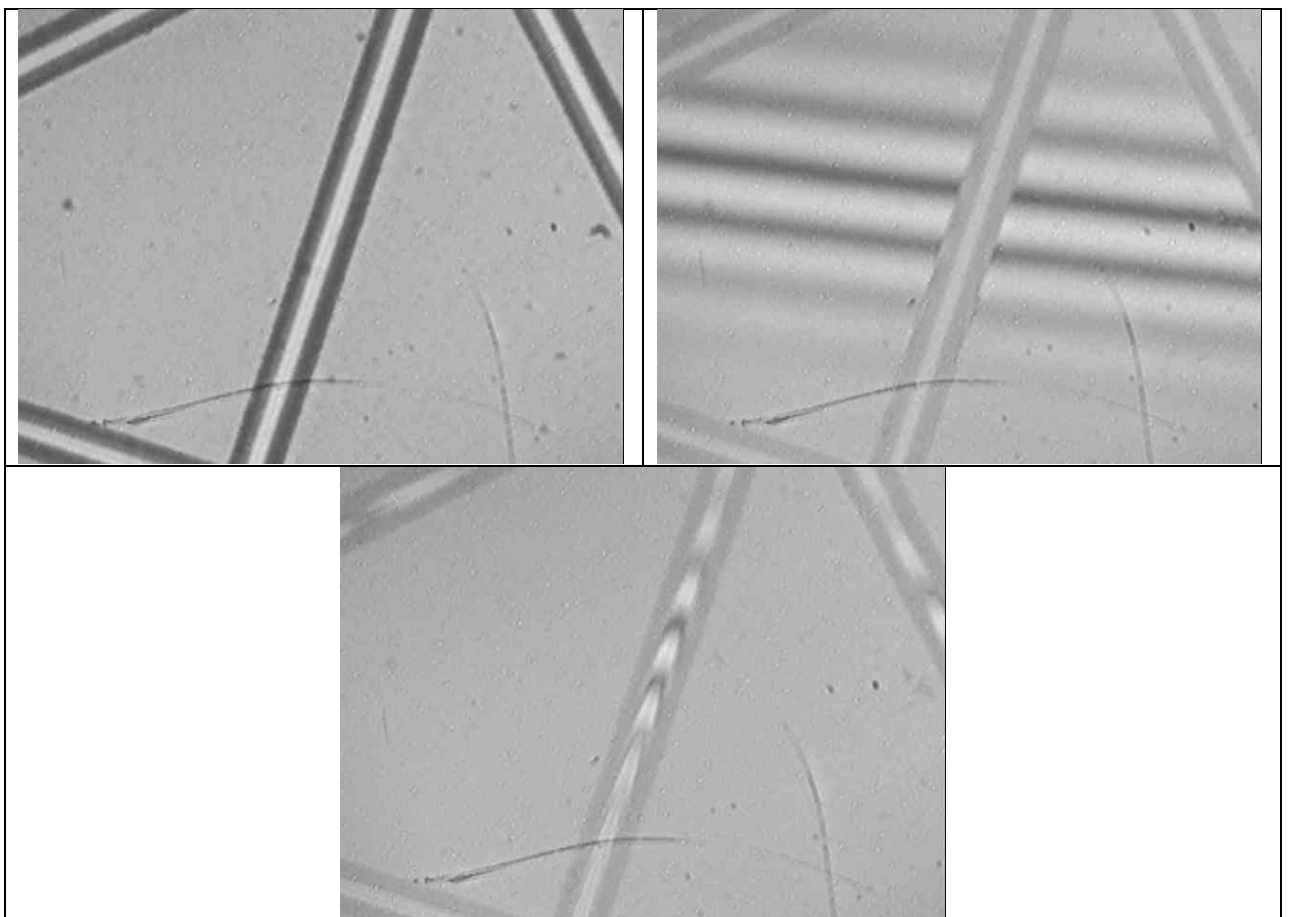
На рисунке 2.29. представлен вид поля зрения микроинтерферометра в режиме наблюдения интерференции с образцом № 2.

Образец № 3. Визуально представляет собой тонкие линии (выступы), сформированные на поверхности стеклянной пластины. Усредненная высота линий составляет 0,4 мкм. Ширина линий – 0.6...1.2 мкм



На рисунке 2.30. представлен вид поля зрения микроинтерферометра в режиме наблюдения интерференции с образцом № 3.

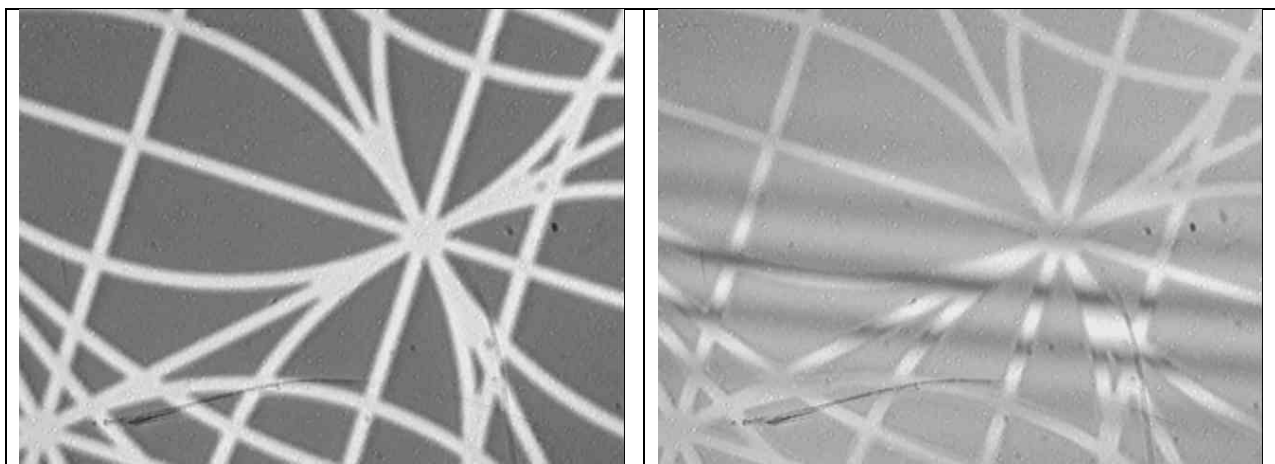
Образец № 4. Визуально представляет собой тонкие линии (канавки), сформированные на поверхности стеклянной пластины. Канавки имеют трапециидальную форму. Ширина канавки на поверхности равна 15 мкм, в глубине - 6мкм. Усредненная глубина равна 5 мкм.



На рисунке 2.31. представлен вид поля зрения микроинтерферометра в режиме наблюдения интерференции с образцом № 1.

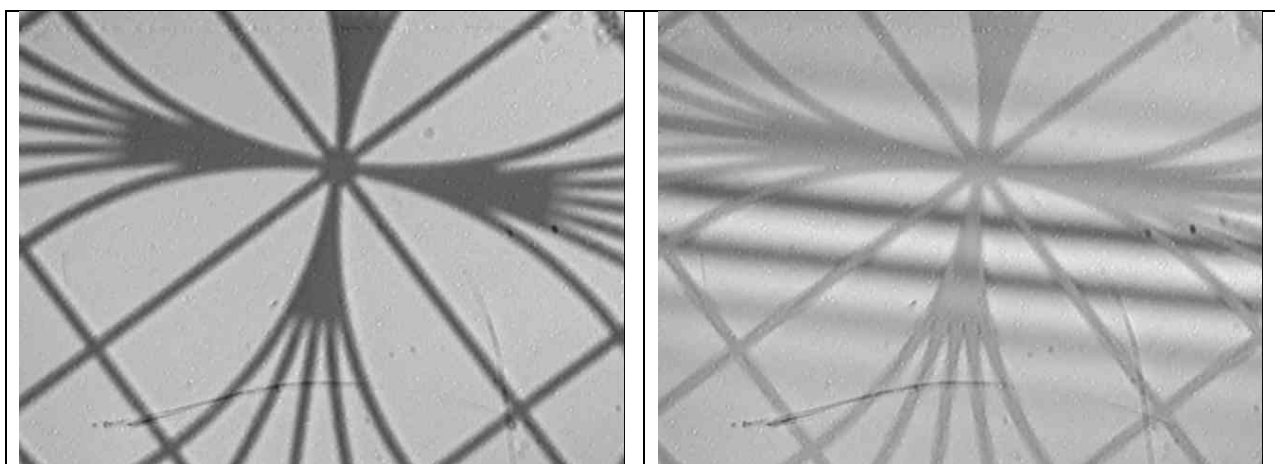
Образец № 5. Визуально представляет собой квадратное окно в слегка прозрачном металлическом покрытии стеклянной пластины. В окне нанесен рисунок матрицы

(позитив) в виде непрозрачных линий. Толщина линий рисунка матрицы (толщина металлического покрытия подложки) составляет около 0,05 мкм. Измерение толщины затруднено в связи с отсутствием отражения света от дорожек рисунка матрицы. Ширина линий - 4,2 мкм



На рисунке 2.32. представлен вид поля зрения микроинтерферометра в режиме наблюдения интерференции с образцом № 5.

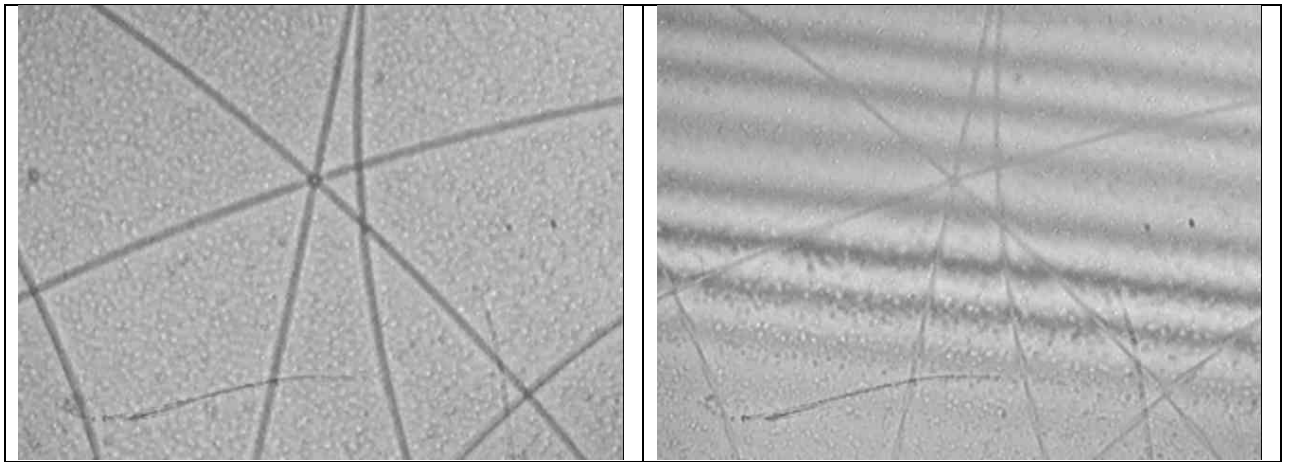
Образец №6. Визуально представляет собой квадратное окно в почти непрозрачном металлическом покрытии стеклянной пластины. В окне нанесен рисунок матрицы виде прозрачных линий (негатив). Толщина металлического покрытия рисунка около 0,05 мкм. Измерение толщины слоя затруднено в связи с отсутствием отражения света от линий рисунка. Ширина линий - 3,4 мкм.



На рисунке 2.32. представлен вид поля зрения микроинтерферометра в режиме наблюдения интерференции с образцом № 6.

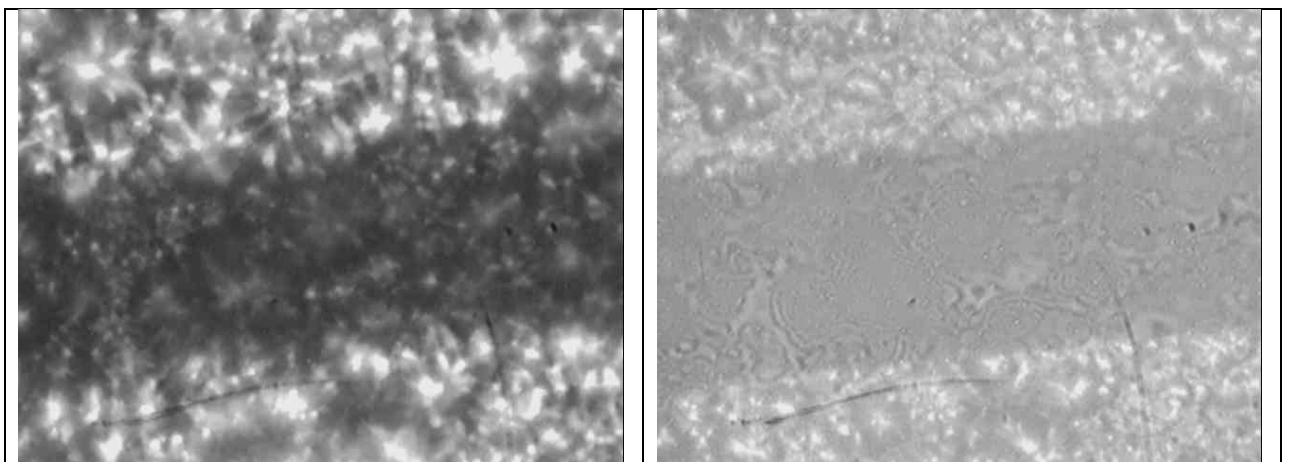
Образец №7. Визуально представляет собой квадратную матрицу размером 7 x 7 мм. Толщина линий составляет 0.27 мкм. Ширина линий равна 0,6 - 0,9 мкм.



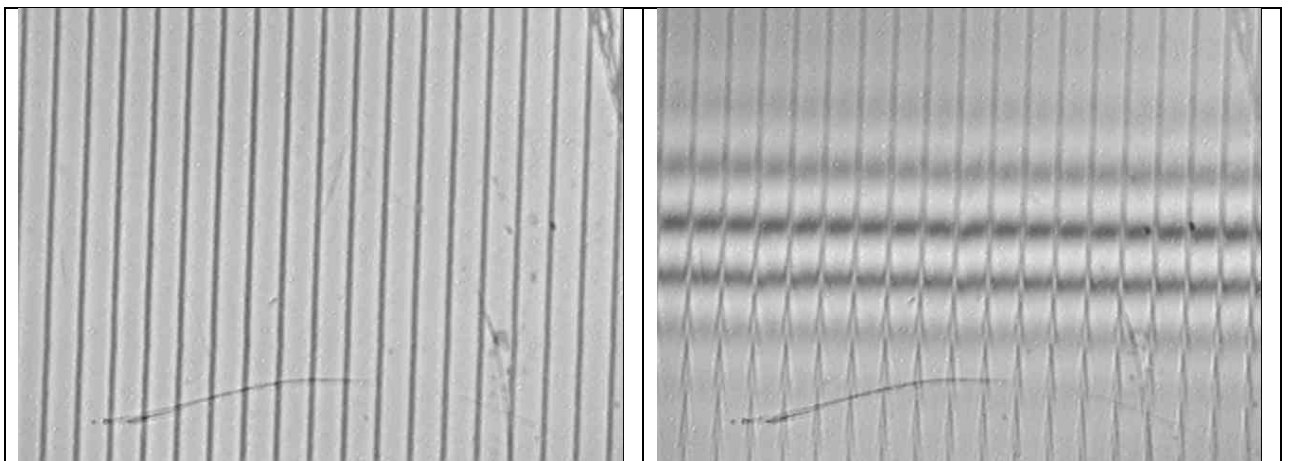


На рисунке 2.33. представлен вид поля зрения микроинтерферометра в режиме наблюдения интерференции с образцом № 7.

Образец №8. Визуально представляет собой типографскую копию матричного рисунка (ферромагнитный слой на алюминиевой подложке). Покрытие подложки представляет собой глобулярную структуру с размером глобул 1 - 20 мкм. Глобулы имеют резкую границу и линию раздела с соседями. Ширина линий рисунка около 60 мкм.



На рисунке 2.34. представлен вид поля зрения микроинтерферометра в режиме наблюдения изображения и интерференции образцом № 6.



На рисунке 2.35. показан вид поля зрения микроинтерферометра в режиме интерференции при использовании в качестве образца объект микрометра с ценой деления 10 мкм.

### **2.6.2. Исследования интерференционных собственных картин, полученных от образцов транспарантов с травлением на стекле и от образцов с субмикронным рисунком 0.5 – 0.9 мкм.**

В дополнение, к проведенным ранее, экспериментальным исследованиям, в которых были получены следующие выводы (см. Отчет №1, [43]) в ходе НИР “Фотошаблон” была проведена серия экспериментальных исследований, которая убедительно подтвердила нижесказанные выводы.

#### **Выводы к Главе 2.**

1. Теоретические и экспериментальные исследования матричных транспарантов с четырех уровневými фрактальными упорядоченными рисунками позволяют заключить, что полученные матричные топологии в оптическом диапазоне 0,4...14 мкм, могут быть интерпретированы как дифракционные решетки с высоким качеством исполнения отражающих (или затеняющих) линий.
2. В ИК-диапазоне дифракционные свойства этих решеток могут быть частично объяснены уравнениями волновой оптики, так как преимущественная структура рисунков транспарантов сводится к двум взаимно развернутым решеткам: ортогональной и диагональной. Эти транспаранты в ИК-диапазоне на пропускание работают как фильтры-пробки, а на отражение – формируют интерференционную картину с особыми свойствами. В видимом диапазоне спектра ЭКМ исследуемые матрицы транспарантов проявляют себя как вторичные генераторы упорядоченной растровой структуры. В лазерном потоке на отражение матрицы транспарантов создают систему пространственных растров, формируемых по четырем осям, смещенным друг относительно друга на  $\frac{\pi}{4}$  радиан.

В лазерном потоке на пропускание матрица транспарантов проявляет себя как анализатор пространственных частот. Картины пропущенного лазерного потока через матрицу непосредственно от источника полностью совпадают с пространственным спектром Фурье, полученным с помощью дифрактометра.