

## Нано-синтез фотонных кристаллов и фрактальных структур в объемных высокоразрешающих регистрирующих средах. (Обзор)

© 2005 Мельников Г.С., Ошарин А.А.\*  
Андреева О.В., Кушнарченко А.П.\*\*

\* - НП ОС «ТКС-оптика» (Санкт-Петербург),  
\*\* - ГУП ВНИЦ ГОИ им. С.И. Вавилова (Санкт-Петербург).

E-mail: [Gmelnikov@list.ru](mailto:Gmelnikov@list.ru)

В статье изложены теоретические и технологические обоснования исследований по разработке принципов создания наноструктур в регистрирующих 3-х мерных высокоразрешающих средах

Наноструктурные 3D конфигурации найдут применение в технике создания спектральных приборов на основе элементов с Бреговской дифракцией, Фурье-фильтров с заданными пространственно-частотными свойствами и оптоэлектронных резонаторных устройств, построенных по типу синфазных антенных решеток.

### Введение

О возможности построения оптических элементов с заданными дифракционными свойствами известно давно.

В 1966 – 67 годах, начиная с работ Лохмана (A.W. Lohmann) [1,2], в этом направлении исследований появилось новое, получившее название – создание компьютерно-синтезированных голограмм (CGH).

К настоящему времени число публикаций по этому направлению перешло за 200. Первоначально технологии CGH (Computer Generated Holograms) строились на создании графически синтезированных оптических транспарантов на плоских или криволинейных поверхностях. Эти транспаранты, как и плоские

голограммы, формируют упорядоченную структуру светового поля в области дифракции Фраунгофера. Дальнейшее развитие работ получило название создания фотонных кристаллов. Фотонные кристаллы формировали заданное объемное распределение дифрагированного излучения и, при внесении в регулярные структуры локальных нарушений, позволяли получать совершенно уникальные свойства. Например, изменение направления движения световых потоков внутри таких регулярных структур. Первоначально фотонные кристаллы создавались механическими или фотохимическими способами. В последние годы эти регулярные структуры формируются на основе технологий - «атом – за атомом».

Авторами [3...11], при экспериментальном исследовании оптических транспарантов с фрактальной графикой, разработанной Фондом Развития Новых Медицинских Технологий «Айрэс» [3], даны математические описания, имеющихся к тому времени у ФРНМТ «Айрэс», графических структур с коэффициентами фрактальности  $k = 4$  и  $8$ . Дальнейшее развитие теоретических и экспериментальных исследований показало возможности синтеза разнообразных структур с заданными дифракционными свойствами, состоящих как из регулярных сеточных элементов, так и из фрактальных элементов [4].

### 1. Обзор методов построения синтезированных голограмм с заданными дифракционными свойствами.

В настоящее время существует большое количество способов записи и обработки получаемой в когерентном свете оптической информации о структуре того или иного физического объекта. Самый распространенный из них, состоит в получении с помощью оптической системы изображения интересующего объекта, его регистрации с использованием возможностей фото- и видеотехники и в последующей апостериорной обработке изображения. Другой способ, также получивший широкое распространение, основан на получении голограммы объекта. Этот способ, в отличие от первого, позволяет регистрировать информацию не только о распределении интенсивности света, отраженного или излучаемого объектом, но и о распределении фазы световых колебаний. Последнее обстоятельство создает дополнительные возможности по

корректировке характеристик изображения. Однако свойства когерентных оптических систем, даже состоящих из традиционных оптических элементов (линзы, зеркала, киноформы, диафрагмы, маски и т.д.), не сводятся только к способности формировать оптические изображения. В ряде случаев их можно рассматривать как некие оптические процессоры, осуществляющие определенные математические преобразования, например, Фурье-преобразования, по отношению к двумерной функции, определяющей распределение комплексной амплитуды на входе системы. Несмотря на кажущееся различие указанных вариантов использования оптических систем, их теоретическое описание имеет много общего.

В 1966 Браун и Лохманн показали, что волновые фронты произвольной формы могут быть воспроизведены с помощью бинарной синтезированной голограммы [1], Лохманн и Парис позже представили более детальное изложение их методики [2]. Бинарные синтезированные голограммы, созданные по их методике представляют собой объект, состоящий из множества прямоугольных апертур. Апертуры пропорциональны амплитудам волнового фронта, рассчитанным для каждой соответствующей точки на плоскости голограммы. Положения апертур относительно центра интервала рассчитывались пропорционально фазе волнового фронта для каждой соответствующей точки на плоскости голограммы. Функция апертуры в бинарной голограмме Лохманна, подобна апертуре в обычной голограмме, потому что они обе могут быть использованы для влияния на фазу и амплитуду световой волны. В обычной голограмме, сформированный волновой фронт с фазой  $\exp[j\phi(x,y)]$  интерферирует с наклоненной плоской волной  $\exp[j2\pi x/x]$ , положения полос определяется следующим уравнением:

$$(x/\Delta x) - [\phi(x,y)/2\pi] = n, \quad (1)$$

где  $n$  - целое число. Таким образом сформированная голограмма в отсутствие любого изменения фазы  $\phi(x,y)$  обладает периодичностью с периодом равным  $\Delta x$ . Если  $\exp[j\phi(x,y)]$  в пределах области

$\Delta x, \Delta y$  стремиться к  $(n\Delta x, m\Delta y)$ , то приближение  $\exp[j\phi(n\Delta x, m\Delta y)]$ , при подстановке в выр. (2.1) для отображения положения полос будет выглядеть следующим образом:

$$x = n\Delta x + \{ [\Delta x \phi(n\Delta x, m\Delta y)] / 2\pi \}. \quad (2)$$

Это же самое уравнение Лохманн использовал для определения положения апертур в своей бинарной синтезированной голограмме. В выр. (2),  $n\Delta x$  задает положение центров каждого из элементов в направлении оси  $x$ , а  $\Delta x \phi(n\Delta x, m\Delta y) / 2\pi$  - отклонение апертуры от центра элементов данной выборки элементов. Может быть замечено, что отклонение от центра элемента данной выборки пропорционально фазе волнового фронта Лохманна. Из-за приближения, бинарная голограмма не может точно воспроизводить желательный волновой фронт. Свободными параметрами голограммы являются зоны и положения апертур в голограмме. Показано, что зоны, и положения апертур могут быть изменены, для воспроизведения требуемого волнового фронта. Продемонстрировано, что бинарный пространственный фильтр, который является частным случаем бинарной голограммы, может быть рассчитан при помощи функции пропускания через функцию фильтра нелинейного ограничителя. В этой секции, два различных параметра голограммы будут использоваться, чтобы отобразить положение и ширину бинарной синтезированной голограммы, определенной выражением подобным выр.(1).

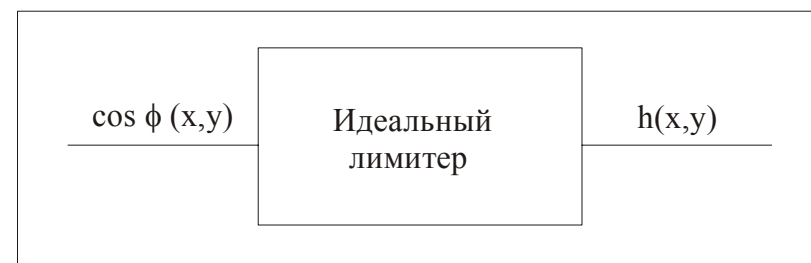


Рис. 1. Идеальный ограничитель воспроизведения бинарной голограммы.

Параметр  $C$  равен  $\cos \pi q$ , где  $0 \leq q \leq 1/2$ . Для волнового

фронта с амплитудой  $A(x, y)$ ,  $q$  -пространственная частота заданная выражением  $[\sin^{-1}(x, y)] / \pi$ . Максимальное значение  $A(x, y)$  нормировано на единицу.

Рассмотрим волновое поле, заданное  $\exp[jm\phi(x, y)]$ . Бинарная голограмма, служащая для восстановления этого волнового фронта может быть записана следующим уравнением:

$$h(x, y) = \left| \sum_{m=0}^{N-1} \frac{1}{N} \exp[jm\phi(x, y)] \right|^2 \quad (3)$$

Сформированную голограмму можно записать как комбинацию волн  $\exp[jm\phi(x, y)]$ . Тогда функция  $h(x, y)$  может быть уменьшена до следующего выражения:

$$h(x, y) = \left( \frac{\sin N\phi(x, y)/2}{N \sin \phi(x, y)/2} \right)^2 \quad (4)$$

Для большого  $N$ ,  $h(x, y)$  равен 1 для случая:

$$\phi(x, y) = 2\pi n, \quad (5)$$

при стремлении значения  $\phi(x, y)$  к 0,  $h(x, y)$  обладает всеми требуемыми свойствами для представления бинарной голограммы. При создании голограммы с помощью выр. (5) существуют решения для всех точек (элементов) в плоскости голограммы. Приведенный в разделе 1 математический аппарат был использован в целом ряде научных исследований [1,2,12...45]. Все названные исследования можно разбить по следующим направлениям:

- Исследование принципов формирования эффектов растровых осей (Hough Transform Slices) [39,43,45],
- Разработка методов построения компьютерно-синтезированных голограмм для пространственной фильтрации излучений. [22...24,28,29,31,33,39],

- Исследование характеристик графически синтезированных голограмм [1,2,14,43],
- Разработка принципов построения трехмерных дисплеев на основе двумерных бинарных голограммах [34,37...39],
- Использование графически синтезированных голограмм (CGH) при совершенствовании структур нейронных сетей [40,41],
- Создание CGH на основе технологий микролитографии [45],
- В двух статьях [31,32] приведены краткие обзоры по методам отработки фрактальной литографии и фракталографии, а также методы измерений дифракционных узоров.
- Особое место заняли статьи, близкие по направлению исследований к тематике настоящей статьи [22...24,27,29,33,35]. В этих работах рассматриваются возможности создания дифракционных узоров заданной конфигурации на основе фрактальных объектов, выполненных по технологии микролитографии.. В статье [35] обсуждаются возможности фракталометрии при создании узоров, представленных на рис 2.



Рис 2. Фрактальные узоры [22].

В работе А. Коновчука [29] приводятся исследования методов построения фрактальных рисунков и спектров мощности на основе классического фрактала – снежинки Коха (рис 3).

Интересен подход Т. Wang, Y. Li и др. [22] по созданию литографическими методами **цифровых** голограмм в которых в качестве базового алгоритма их построения используются аффинные преобразования треугольника Серпинского.

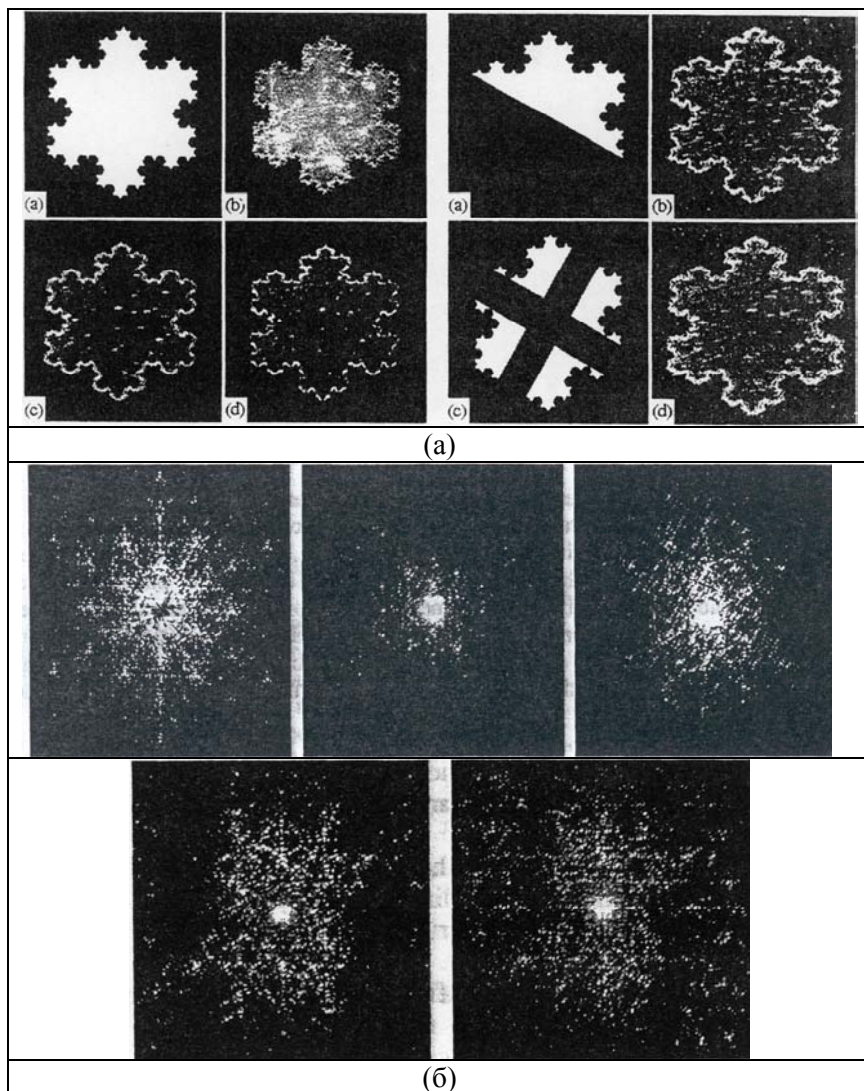


Рис 3. а – Фрактальные рисунки, б – Спектры мощности по [29].

## 2. Математическая модель построения графически синтезированных голограмм.

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 синтезаторов растровых осей с помощью компьютерных голограмм (multiple Hough transform slices, НТ CGH) [3].

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

$$-\frac{q}{2} \leq \frac{x}{T} + \frac{\phi(x, y)}{2\pi} + n \leq \frac{q}{2}, \text{ где } q \text{ — константа, определяющая ширину интерференционной полосы}$$

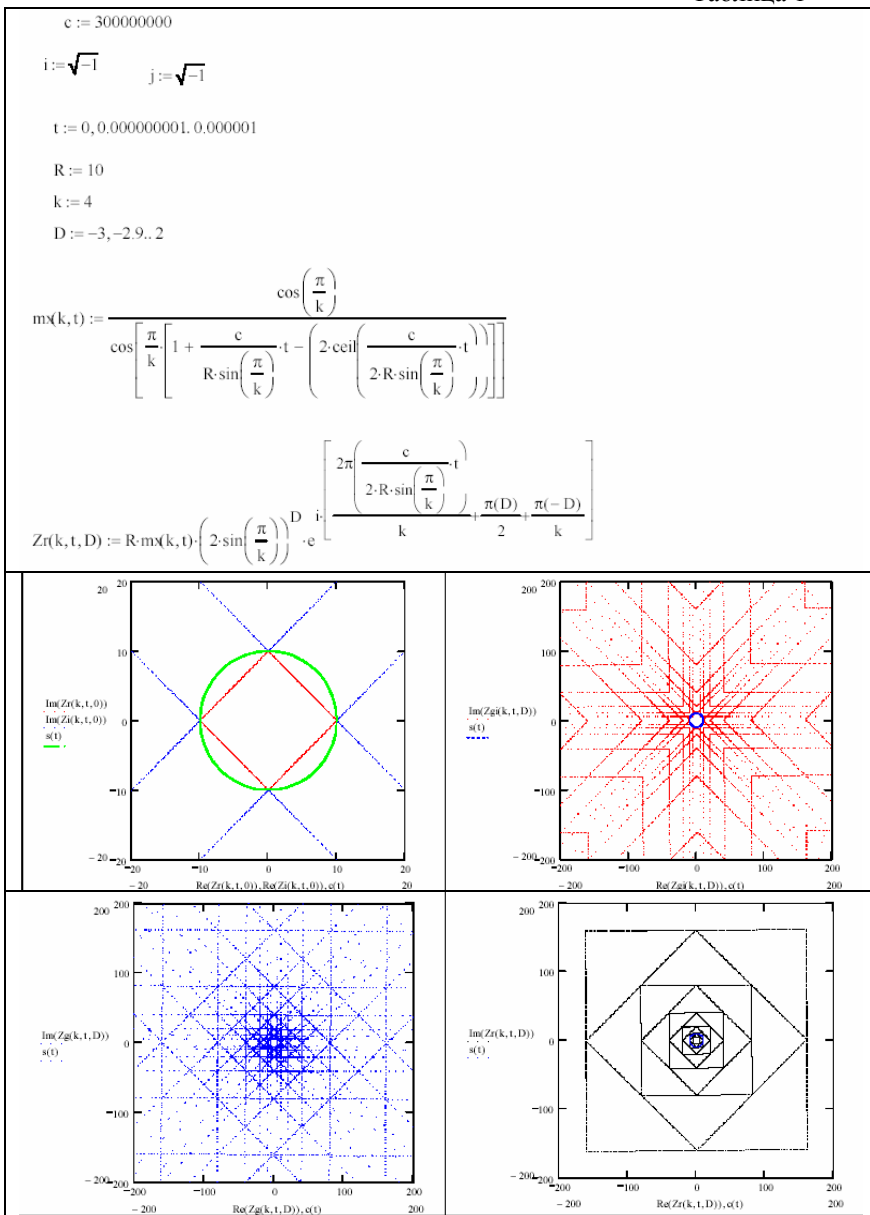
$T$  — период дифракционной решетки  
 $\phi(x, y)$  — функция изменения фазы волнового фронта  
 $n$  — целое число

Этот теоретический подход удовлетворительно описывает явления, формируемые графическими транспарантами с регулярной сеткой решеток называемых дифракционными.

Автор работ [3...11], на основании решения задачи математических бильярдов в круге и сфере в комплексной и кватернионной формах, вывел и промоделировал найденные выводы в программе Math Cad, что в дальнейшем позволило авторам [47] найти общие принципы синтеза и дифракционного анализа регулярных структур на плоскости и в пространстве. Результаты вывода и моделирования параметрических уравнений приведены в табл. 1.



Таблица 1



О возможности построения 5 типов регулярных сеточных полей на плоскости еще в 1849 году сообщил великий кристаллограф О. Браве в своей работе «Мемуар о системах точек» [46]. На основе этих работ автором построены графические фрактальные структуры с заданными дифракционными свойствами. Анализ этих свойств посвящен доклад [47]. Последующие результаты были получены по математическому построению 3-х мерных решеточных структур, как регулярных, так и фрактальных.

Все математические и графические построения промоделированы в программах CorelDRAW (А.А. Ошарин), MathCad и Mathematica (Г.С. Мельников). В результате этих построений получены как регулярные сеточные конфигурации по О.Браве и их фрактальных круговых аналогов (см. Табл.2), так и регулярные различные конфигурации типа «паркетов» с их круговыми фрактальными «аналогами» [48]

Таблица 2

Регулярные сеточные фрактальные структуры на плоскости, классифицированные по О. Браве

<p>Рациональная фрактальная графика аналог сетки 1-го класса по О. Браве.</p>	<p>Эквивалент рациональный фрактальной графика 1-го класса по О. Браве.</p>

продолжение таблицы 2

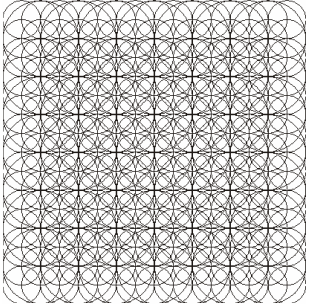
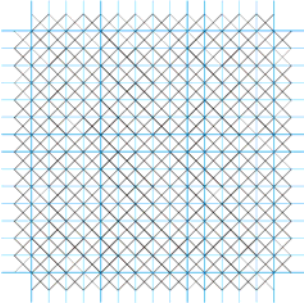
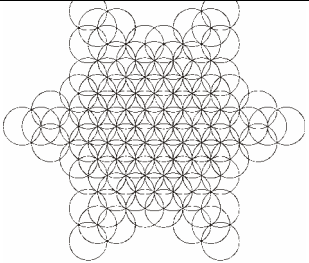
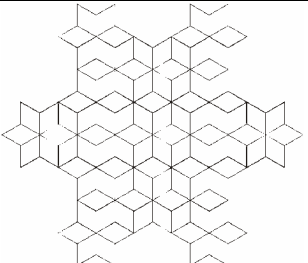
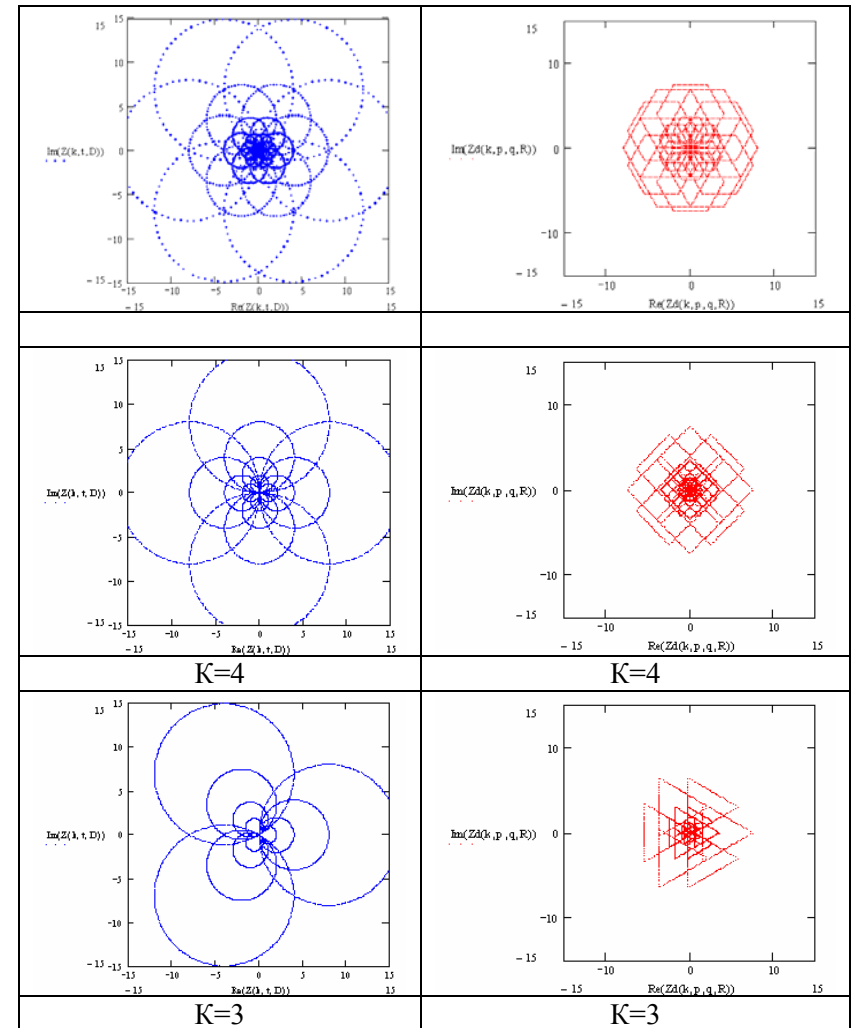
	
Рациональная фрактальная графика аналог сетки 2-го класса по О. Браве	Эквивалент рациональной фрактальной графики 2-го класса по О. Браве
	
Рациональная фрактальная графика аналог сетки 3-го «а» класса по О. Браве.	Эквивалент рациональной фрактальной графики 3-го «а» класса по О. Браве

Таблица 3

Моделирование фрактальных и регулярных структур в программе MathCad



Результаты экспериментальных и модельных исследований по анализу дифракционных характеристик графически синтезиро-

ванных голограмм со структурой решеток, приведенных в Табл. 2 и 3 представлены в таблицах 4 и 5.

Таблица 4

<p>Рациональная фрактальная графика аналог сетки 1-го класса по О. Браве.</p>	<p>Эквивалент рациональный фрактальной графики 1-го класса по О. Браве.</p>								
<p>Регулярные сеточные фрактальные структуры на плоскости, классифицированные по О. Браве I класса [4].</p>									
<table border="1"> <tr> <td colspan="2" data-bbox="479 767 703 786"> <p>Ближняя зона (дифракция Френеля)</p> </td> </tr> <tr> <td data-bbox="282 786 568 999"> </td> <td data-bbox="568 786 860 999"> </td> </tr> <tr> <td colspan="2" data-bbox="465 999 716 1018"> <p>Дальняя зона (дифракция Фраунгофера)</p> </td> </tr> <tr> <td data-bbox="282 1018 568 1230"> </td> <td data-bbox="568 1018 860 1230"> </td> </tr> </table>		<p>Ближняя зона (дифракция Френеля)</p>				<p>Дальняя зона (дифракция Фраунгофера)</p>			
<p>Ближняя зона (дифракция Френеля)</p>									
<p>Дальняя зона (дифракция Фраунгофера)</p>									
<p>Фурье-образы дифракционных узоров в когерентном излучении (<math>\lambda=0,6328</math> мкм) от дифракционных матриц с топологией О. Браве (круговая графика - левые столбцы, линейная графика - правые столбцы)</p>									

Как видно из сравнения Фурье-образов, полученных от транспарантов с регулярной сеточной структурой, и фрактальной структурой с концентрическими и разнесенными по центрам фрактализации плоскости само подобных окружностей, следует, что регулярные сеточные структуры, (так же как известные плоские дифракционные решетки), формируют системы дифракционных максимумов по тем или иным осям симметрии. В технике компьютерно-синтезированных голограмм такие транспаранты создают Multiple Hough Transform Slices (дифракционные оси симметрии) - эффекты [5...739,43,45]. Диапазон углов дифракции лучей во Фраунгоферовой области составляет примерно  $\pm 45...50^\circ$ .

Диапазон углов дифракции при таких эффектах составляет примерно  $\pm 45...50^\circ$ .

Диффракционная эффективность транспарантов с фрактальной графикой существенно выше и характеризуется следующими особенностями :

- диапазон углов дифракции составляет примерно  $\pm 90^\circ$ .
- дифракционные максимумы распределяются не только по осям симметрии, но и по всему пространству.

Такие транспаранты можно назвать широкополосными фильтрами Фурье. (см. для сравнения Фурье образы в таблице 4).

Результаты моделирования для графически синтезированных фрактальных топологий с коэффициентами фрактальности от  $k=3$  до  $k=8$  приведены в таблице 5. Моделирование проведено в специализированной программе расчета, авторы - коллектив программистов под руководством В. Черненко.

Методы моделирования 3D- конфигураций выполнены в программах MathCad и Mathematica, иллюстрация возможностей математического моделирования приведена в таблице 6.

Таблица 5


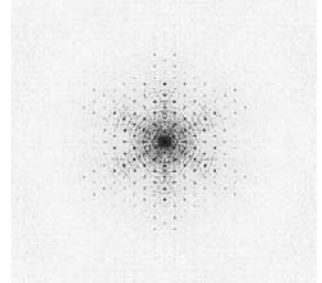
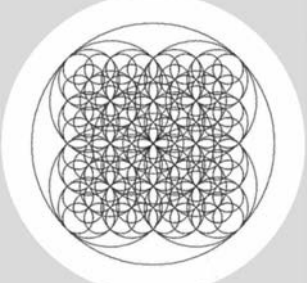
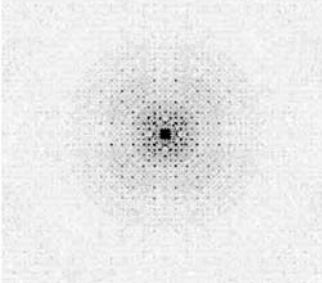

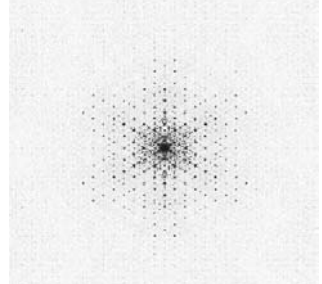
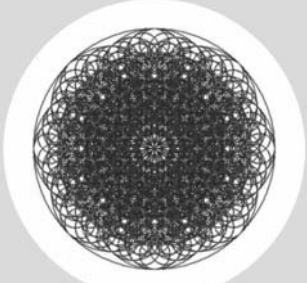
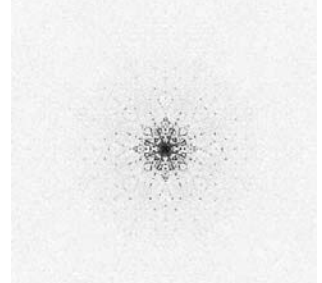
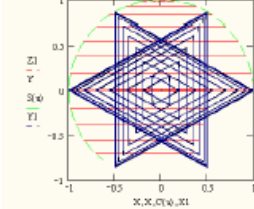
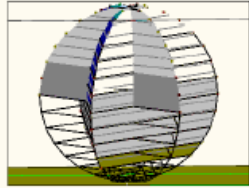
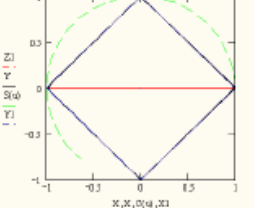
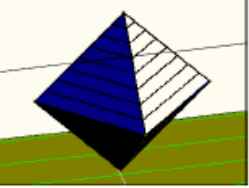
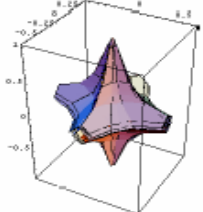
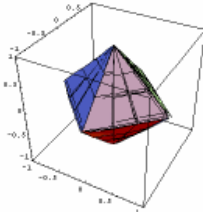
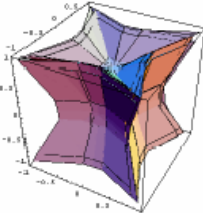
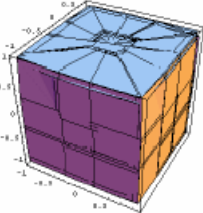
k=3		
k=4		
k=6		
k=8		

Таблица 6

<p><b>Матрично-параметрическое моделирование 3 D-конфигураций и их сечений в программе MathCad</b></p>	
	
	
<p><b>Параметрическое моделирование гиперболического и евклидова октаэдров в программе Mathematica</b></p>	
	
<p><b>Параметрическое моделирование гиперболического и евклидова кубов в программе Mathematica</b></p>	
	



### 3. Трехмерные голографические регистрирующие среды

Развитие трехмерной голографии и ее практических приложений неотделимы от прогресса в области разработки и создания материалов для регистрации трехмерных голограмм.

Для получения описанных выше структур предлагается использовать разработанные в Государственном Оптическом Институте объемные регистрирующие среды на основе полимера с фенантренхиноном и пористые серебросодержащие среды [49,50].

Получение объемных голограмм и ГОЭ с толщиной порядка 1мм предъявляет высокие требования к физико-механическим свойствам среды. Для создания объемных безударочных сред применяют композиционные материалы, один из компонентов которых служит жестким каркасом, а другой – светочувствительной композицией. Жесткий каркас таких материалов обеспечивает пористое стекло и полимер, а в качестве светочувствительной композиции применяется галоидное серебро с желатиной и органический краситель фенантренхинон.

#### Пористые серебросодержащие среды.

Наиболее плодотворная идея создания объемных безударочных регистрирующих сред для голографии на основе пористого стекла заключалась в том, что используемая светочувствительная композиция должна занимать не весь свободный объем пористого стекла, а только его часть, оставляя возможность осуществления пост экспозиционной обработки таких материалов водными растворами (включая проявление, фиксирование, отбеливание и т.д.). При создании регистрирующих сред на основе пористого стекла светочувствительная композиция представляет собой твердофазную оболочку, жестко связанную со стенками кремнеземного каркаса и занимающую только часть свободного объема пор, что обеспечивает доступ растворов реагентов внутрь образца при его химико-фотографической обработке.

Синтез светочувствительной галоидосеребряной композиции производился внутри пористого каркаса в присутствии защитного коллоида желатины с максимальным приближением к технологическим режимам получения высокоразрешающей фото-

графической эмульсии ПФГ-03, предназначенной для получения отражательных голограмм по методу Ю.Н.Денисюка.

В процессе синтеза на размер образовавшихся светочувствительных зерен галоидного серебра естественные ограничения накладывает размер пор кремнеземного каркаса.

Светочувствительность пористой серебросодержащей регистрирующей среды обеспечивает галоидосеребряная композиция с желатиной в качестве защитного коллоида – традиционная светочувствительная композиция для изготовления фотографических материалов. До сих пор фотографические галоидосеребряные среды по совокупности параметров остаются непревзойденными светочувствительными материалами – их исследование и совершенствование имеют уже полутора вековую историю.

В список важнейших параметров галоидосеребряных слоев (среди которых – возможность получения высокой чувствительности, широта спектральной сенсibilизации, разнообразие методов пост экспозиционной обработки и т.д.) пористые галоидосеребряные среды добавляют еще один – возможность получения безударочной галоидосеребряной среды значительной толщины, допускающей пост экспозиционную обработку химико-фотографическими растворами. Такую возможность обеспечивает пористое стекло – основа для изготовления пористых галоидосеребряных сред, физико-химическая прочность которого близка к прочности силикатного стекла.

Следует обратить внимание также на то, что при химико-фотографической обработке пористых галоидосеребряных сред формируются проявленные частицы серебра в виде коллоидных частиц серебра сферической формы, размер которых не может превышать максимальный диаметр пор, т.е. в данной среде после ее обработки не может быть частиц серебра с размером более 20 нм. Это создает условия для формирования среды, прозрачной в ИК области спектра, которая может создавать эффективную фазовую модуляцию при получении голограмм и допускает введение иммерсии в свободный объем пор без снижения эффективности полученных голограмм. Трудоемкость и сложность получения таких регистрирующих сред могут быть возмещены совокупностью параметров, недостижимых при использовании других сред и методов.

## Полимерный материал «Диффен»

Создание материала, который осуществляет на практике два плодотворнейших принципа конструирования объемных регистрирующих сред, - принцип дисперсионной рефракции и принцип диффузионного усиления - началось в ГОИ в 80-х годах XX века. Органический краситель фенантренхинон (ФХ) при взаимодействии с излучением образует фото продукт, обладающий поглощением в коротковолновой области спектра и высокой прозрачностью в видимой области спектра. Что обеспечивает, согласно принципу дисперсионной рефракции, возможность получения значительной фазовой модуляции среды и, естественно, получение высокоэффективных голограмм. Полимерная среда с ФХ представляет собой твердый раствор органического красителя (в отличие от жестко связанного с полимером фотопродукта) и позволяет осуществлять диффузию молекул ФХ, приводящую к перераспределению концентрации ФХ по объему образца, что обеспечивает постэкспозиционное усиление зарегистрированной интерференционной структуры.

Разрешающая способность исследуемого регистрирующего материала с традиционной точки зрения определяется размерами молекул фенантренхинона (ФХ), диаметр которых составляет величину порядка 20 нм. Регистрация голограмм-решеток на материале такого типа производилась на максимальной пространственной частоте около  $3000 \text{ мм}^{-1}$  с эффективностью выше 80% [50], но с уверенностью можно сказать, что возможности материала по регистрации интерференционной структуры высокой пространственной частоты далеко не исчерпаны.

В то же время, достижимая амплитуда фазовой модуляции голограмм-решеток, зарегистрированных в среде с диффузионным усилением на различных пространственных частотах, определяется скоростью диффузии, что приводит к уменьшению фазовой модуляции в области низких пространственных частот. За счет чего материал имеет необычную для традиционных светочувствительных материалов частотно-контрастную характеристику – амплитуда фазовой модуляции зарегистрированных голограмм увеличивается с увеличением пространственной частоты голограммы, а в

области низких пространственных частот (менее  $50\text{-}100 \text{ мм}^{-1}$ ) регистрация голограмм невозможна. Использование таких сред может быть весьма полезным при записи информации, требующей исключения низкочастотной составляющей пространственного спектра излучения.

Материал «Диффен» позволяет регистрировать интерференционную структуру, параметры которой не изменяются в процессе постэкспозиционной обработки, что позволяет избежать искажений регистрируемой информации в широком динамическом диапазоне.

Принято считать, что полимерная основа материала не позволяет изготавливать высококачественные оптические детали. Однако в настоящее время имеется возможность нанесения защитных покрытий на полимерную основу. При этом прочность поверхности полимерных образцов приближается к прочности деталей из силикатного стекла, что, несомненно, расширяет возможности и увеличивает перспективы использования материала «Диффен» для получения голограммных оптических элементов.

Материал «Диффен» относится к группе полимерных регистрирующих материалов, в которых реализован принцип диффузионного усиления, в настоящее время плодотворно используемый различными авторами в ряде научно-технических разработок. Существует ряд модификаций сред с использованием в качестве светочувствительного компонента органического красителя фенантренхинона. Название «Диффен» (от слов ДИФфузионный и ФЕНантренхинон) дано группой разработчиков этого материала, чтобы выделить из ряда модификаций полимерной среды с диффузионным усилением на основе фенантренхинона материал, образцы которого имеют определенные голографические и физико-механические параметры, определяемые разработанным режимом синтеза образцов и режимом получения голограмм.

#### 4. Возможные методы практической реализации, теоретически рассчитанных пространственных конфигураций, с наноразмерным характером оптических неоднородностей

Авторы настоящего доклада ставят перед собой задачу поиска технологий записи регулярных и фрактальных структур в объемных высокоразрешающих регистрирующих средах. Такие среды, разработанные для целей голографии, имеют гораздо более широкие перспективы использования. Например, они могут быть использованы для получения слабоконтрастных фотонно-кристаллических структур (ФКС) различной конфигурации с заданными дифракционными свойствами. Для получения заданной конфигурации распределения показателя преломления в объеме среды (образца) могут быть использованы различные способы проведения этапа регистрации.

1. Формирование интерференционной структуры в объеме регистрирующей среды путем когерентного сложения двух или более монохроматических волн (запись одиночной голограммы). В простейшем случае использования двух плоских когерентных монохроматических волн будет получена одномерная решетка в объемной среде (элементарная голограмма), так называемая Брэгговская решетка, которая позволяет осуществлять селекцию излучения по длинам волн и пространственным частотам.

Различные варианты более сложной пространственной конфигурации могут быть созданы при использовании различной пространственной структуры когерентных волн (например, сферические, цилиндрические, модулированные различными транспарантами и т.д.) и использования не только двух, но трех и более интерферирующих волн,

2. Формирование интерференционной структуры путем сочетания методов когерентного и некогерентного сложения результатов взаимодействия когерентных интерферирующих пучков (запись мультиплексной голограммы). Мультиплексная голограмма образуется в объеме регистрирующей среды при наложенной друг на друга записи нескольких одиночных голограмм. Мультиплексиро-

вание может быть произведено либо по углу падения излучения на регистрирующую среду (образец), либо по длине волны излучения. Однократная запись – когерентное сложение интерферирующих пучков. Структура готовой мультиплексной голограммы обусловлена некогерентным (аддитивным) сложением параметров интерференционной картины в каждой точке объема регистрирующей среды с учетом ее свойств.

3. Воспроизведение в объеме регистрирующей среды отдельных участков пространственной структуры волнового поля произвольного объекта путем его когерентного сложения с заданной референтной волной. Этот способ может быть весьма перспективным для получения в объеме среды заданной пространственной конфигурации, при использовании в качестве модулирующих объектный пучок транспарантов графически и компьютерно-синтезированных двумерных структур заданной конфигурации.

Для получения описанных выше структур предлагается использовать разработанные в Государственном Оптическом Институте объемные регистрирующие среды на основе полимера с фенантренхином и пористые серебросодержащие среды (раздел 3).

Одним из авторов уже решена задача построения аналитических алгоритмов синтеза фотошаблонов для получения оптических транспарантов - компьютерно-синтезированных голограмм (CGH) - фотолитографическими способами. Авторы предполагают перенести результаты исследований двумерных синтезированных структур на структуры, полученные в трехмерных регистрирующих голографических средах, и ставят задачу создания технологий получения наноразмерных объемных конфигураций с управляемыми дифракционными свойствами.

Какими путями и технологиями можно достичь результатов в нашей постановке задачи исследований?

На наш взгляд решение можно достичь несколькими путями:

**первый путь** – Традиционный путь синтеза двумерных голограмм по схеме Ван дер Люгта для построения пространственных фильтров

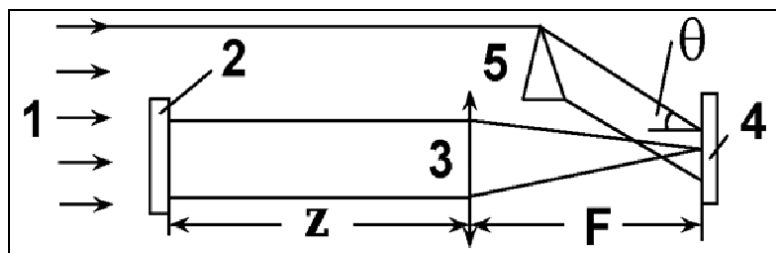


Рис. 6. Метод проекционного синтеза по схеме Ван дер Люгхта (источник - <http://optics.npi.msu.su/co/toc.html> [54]).

Однако, различия технологии создания 3D структур с методом построения двумерных транспарантов будет отличаться в том, что фотошаблоны 2 будут представлять собой набор послойных сечений 3D макета структуры, синтезированной в одном из графических редакторов, а каждая проективная запись будет осуществляться на собственных длинах волн, с характерной глубиной записи фазовой информации в регистрирующую голографическую среду.

**второй путь** – Методы использования Френелевых мастер-пластин и компьютерно синтезированных голограмм с регулярной и фрактальной структурой.

В технике построения дифракционных элементов с заданными свойствами широко используется принцип использования в качестве модулирующих объектный пучок различных мастер-пластин. В наших исследованиях предполагается формирование Френелевых мастер-пластин

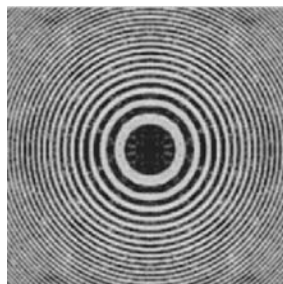
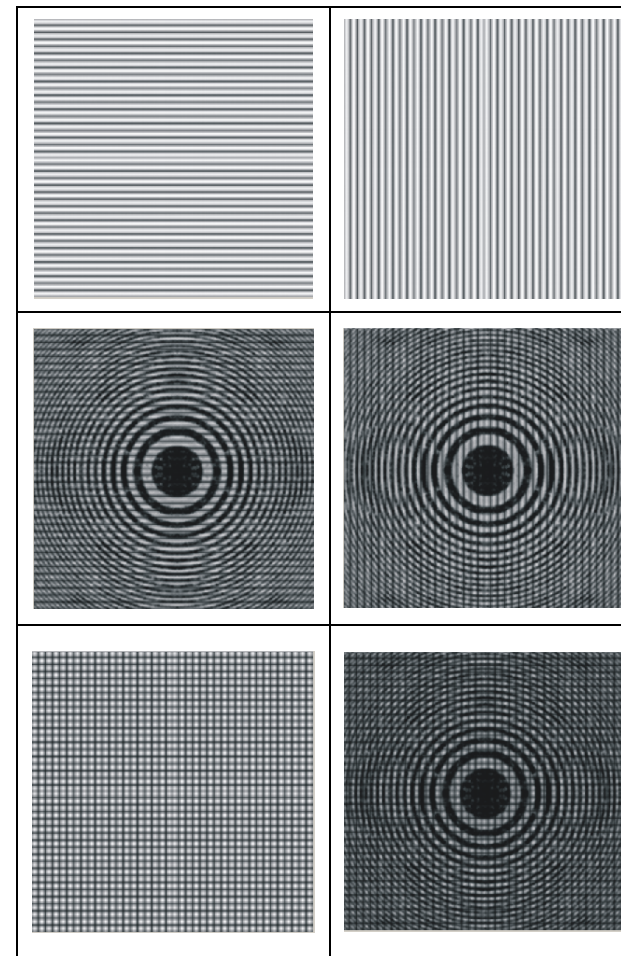


Рис.7. Френелева мастер-пластина

Исследованиями авторов установлено, что путем изменения масштабов мастер-пластин или опорных транс-

парантов с регулярной бинарной графикой можно управлять их суммарными интерференционными свойствами путем их когерентного сложения с заданной референтной волной с возможностью записи картины в трехмерную высокоразрешающую регистрирующую среду. С помощью мастер-пластин эффективно можно выделять центры фрактализации и синтезировать фрактальные структуры (табл. 7.).

Таблица 7





**третий путь** – Методы цифрового синтеза заданных 3D структур.

Цифровой голографией называется метод получения и восстановления голограмм, при котором основная роль отводится компьютеру. Роль компьютера заключается в расчете распределения коэффициента прозрачности или преломления по полю голограммы, которое затем записывается в оптической запоминающей среде. С помощью компьютера рассчитывается и восстанавливается изображение, которое записано на такой синтезированной голограмме и которое можно было бы получить оптическим путем.

Имеется ряд веских оснований для такого синтеза голограмм и, в частности, то обстоятельство, что геометрические размеры голографического объекта в этом случае не ограничиваются такими факторами, как когерентность освещения, вибрация или турбулентность воздуха, и появляется возможность исследовать путем моделирования некоторые голографические эффекты. Рассчитанное фазовое поле предполагается восстанавливать с помощью ПЗС матриц с последующим переносом изображения на пространственно-временные модуляторы света (ПВМС) и считыванием объектного пучка когерентным источником света.

## 5. Анализ предложенных методов и ожидаемые результаты.

Предлагаемые принципы формирования структур в трехмерных регистрирующих средах перспективны для построения технологий структурного синтеза дифракционных элементов с заданными и управляемыми свойствами.

Полученные в результате проведения работы элементы могут представлять собою трехмерные структуры со следующими характеристиками:

- толщина линий – 10...200 нм,
- диапазон средних периодов решеточных конфигураций составляет 20 нм ... 10 мкм,
- конфигурация (любая из 7 сингоний): Кубическая, Тетрагональная, Ромбическая, Ромбоэдрическая (тригональная), Гексагональная, Моноклинная, Триклинная.

В дальнейшем предполагается разработка принципов создания фрактальных структур с заданным коэффициентом фрактальности и заданной фрактальной размерностью, которые не имеют природных аналогов

Однако, для желающих повторить или проверить описанные принципы построения регулярных трехмерных структур – фотонных кристаллов с нано-размерными измерениями следует разобраться с принципами резонансного взаимодействия этих структур не только с когерентными и некогерентными световыми потоками, а так же и с резонансными взаимодействиями и реакцией на присутствие органических и биологических соединений и микроорганизмов с соразмерными конфигурациями и формами. При этом, следует помнить, что как регулярные конструкции с системами линий и криволинейных элементов с коэффициентами фрактальности 3 и 6 (плоскости и их круговые фрактальные аналоги по типу плоскостей О. Брауэ 1<sup>го</sup> и 3<sup>го</sup> классов), а так же фуллерено-подобные, не естественные композитные материалы и конструкции не отвечают ни одной из известных сингонией естественных кристаллов. Из органических и биологических объектов, подпадающих под эту классификацию можно назвать большинство вирусов и раковых клеток [52,53]. Учитывая же, что графически синтезированные голограммы уже прошли проверку на взаимодействие и оптическое выделение присутствия различных микрообъектов по типу лакмусовых бумаг, (ссылки смотрите в оригинале и в переводе, соответственно):

[www.smartholograms.com/site/sections/technology/creating\\_sensors.html](http://www.smartholograms.com/site/sections/technology/creating_sensors.html)

[www.membrana.ru/articles/health/2005/02/21/192300.html](http://www.membrana.ru/articles/health/2005/02/21/192300.html),

то следует помнить о возможном резонансном взаимодействии и усилении роста названных микроорганизмов. Логика этого предостережения основана на принципах работы затравочных кристаллов при выращивании естественных кристаллов из раствора молекул с заданными химико-физическими связями.

## Выводы:

1. В настоящее время авторами разработан математический аппарат классификации трансформаций многогранных и фрактальных структур.

2. Математические уравнения, описывающие регулярные и фрактальные структурные конфигурации промоделированы в программах MathCad и Mathematica.
3. Предложены принципы синтеза наноструктур в регистрирующих трехмерных средах.
4. Работы предусматривают разработку технологических методов реализации компьютерно моделируемых наноструктур с заданными дифракционными свойствами в высоко-разрешающих регистрирующих средах.
5. Проведение исследований в данном направлении следует вести с учетом предостережений раздела 5 статьи.

### Заключение

Существующие принципы и направления по созданию объемных нано-структур, либо требуют аппаратных средств точного позиционирования и последовательных технологий их построения - «атом за атомом», либо основаны на принципах неуправляемого синтеза структур с нано-порошковым заполнением в полимерных средах.

Исследования предлагаемые авторами статьи предполагают отработку параллельных принципов синтеза нано-структур с заданными дифракционными и пространственно-частотными свойствами.

Предлагаемые методы позволяют реализовать как управляемые принципы формирования заданных дифракционных картин и каналирование в оптике, так и управляемые устройства для электромагнитных излучений других диапазонов ЭМК.

1. B. R. Brown and A.W. Lohmann, Appl. Opt. 5, 967 (1966).
2. A.W. Lohmann and D. P. Paris, Appl. Opt. 6, 739 (1967).
3. Мельников Г.С. Геометрия внутреннего сопряжения базовых ква-тернионов. <http://www.hypercomplex.ru/Melnicov.doc>
4. Melnikov G.S. Gnoseology of fractality – fractal optics, Proc. SPIE 1997, vol.3010, p. 58–68 ([www.spie.org/abstracts/3000/3010.html](http://www.spie.org/abstracts/3000/3010.html))
5. Мельников Г.С., Ларионов С.А., Михеев П.А., Цветков Е.А.// Изв. АН, Серия физическая, М., 1995., т 59, N12, с143...150ю Gennady S. Melnikov, Sergey A. Larionov, Pyotr A. Mikheev, Eugeny A. Tsvetkov "Discrete scanning systems for digital optical processing and transfer of images by systolic methods", journal B.R.A.S PHYSICS, Vol.59 No. 12 1995, pp2097-2103 Allerton Press, Inc./ New York.
6. Г.С. Мельников Геометрическое поле пространственных частот. Вывод параметрических уравнений гиперкомплексных отображений

- дискретных циклических процессов. Материалы конференции Компьютерное моделирование электромагнитных процессов в физических, химических и технических системах. Третий Международный семинар (г. Воронеж, 22-24 апреля 2004 г.) <http://www.vorstu.ru/vstu/news/3e11amelnikovd.htm>
7. Г.С. Мельников Геометрическое поле пространственных частот. Результаты математического моделирования уравнений гиперкомплексных отображений дискретных циклических процессов. Материалы конференции Компьютерное моделирование электромагнитных процессов в физических, химических и технических системах. Третий Международный семинар (г. Воронеж, 22-24 апреля 2004 г.) <http://www.vorstu.ac.ru/vstu/news/3e11bmelnikovd.htm>
  8. Г.С. Мельников. Вывод и моделирование уравнений геометрического поля пространственных частот. «Оптика и спектроскопия», рег. № 136 от 6.05.2003г. (в печати).
  9. Г.С. Мельников. Фрактальная гносеология порядка и хаоса числового континуума и пространства-времени. В сб. Вероятностные идеи в науке и философии., (Материалы региональной конференции с участием иностранных ученых), РИЦ НГУ.2003, 207с.
  10. Г.А Донцов, Г.С. Мельников, И.Н. Серов. Фрактальная концепция детерминированного хаоса. Философия науки, Новосибирск-90, №3, 2003г., с. 35-52. Г.С.
  11. Мельников, А.А. Ошарин. Экспериментальное подтверждение выводов по физико-математическому моделированию решетчатых и шаровых упаковок пространства и моделированию уравнений геометрического поля пространственных частот. Санкт-Петербург, НП ОС "ТКС-оптика", 2004. [http://soi.srv.pu.ru/r\\_1251/investigations/fractal\\_opt/data5/data5.html](http://soi.srv.pu.ru/r_1251/investigations/fractal_opt/data5/data5.html)
  12. A. Kozma and D. L. Kelly, Appl. Opt. 4, 3871 (1965).
  13. A. W. Lohmann and D. P. Paris, Appl. Opt. 9, 1567 (1967).
  14. J. W. Goodman and A. M. Silvestri, IBM J. Res. Dev. 14, 478 (1969).
  15. N. S. Szabo and R. I. Tanaka, *Residue Arithmetic and Its Application to Computer Technology* (McGraw-Hill. New York 1967), p. 16.
  16. O. Bryngdahl, J. Opt. Soc. Am. 63, 1098 (1973).
  17. Y. Ichioka and A. W. Lohmann, Appl. Opt. 11, 2597 (1972).
  18. W. H. Lee, Binary Synthetic Holograms, Applied Optics Vol. 13, No. 7, S.1677, (July 1974).
  19. Ravikanth Pappu, Nonuniformly sampled computer-generated holograms, Opt Eng. 35(6) S. 1538-1544, (June 1996).

20. A.Marquez, J.Campos, M.J.Yzuel i.s. Production of computer-generated phase holograms using graphic devices: application to correlation filters, *Opt. Eng.* 39(6), S. 1612-1619, (June 2000).
21. V. R. Riasati and D. A. Gregory, Feature Extraction with Wavelet Transforms for Implementation of The Projection-Slice Filter, *SPIE Vol.* 3715, S. 259, (April 1999).
22. Tianji Wang, Yaotang Li, Shining Fan, Shaowu Zhang, Huanrong Wen, Fractal in laser lithographic digital hologram, *SPIE Vol.*3491, S. 1141 (1998).
23. Kenneth A. Herren and Don A. Gregory, The Calculation of Fractal Dimension in the Presence of Non-fractal Clutter, *SPIE Vol.*3715, S. 216, (April 1999).
24. Stephen Demko, Mehdi Khosravi, Keshi Chen, Image Descriptors Based on Fractal Transform Analysis, *SPIE Vol.*3656, S. 379, (January 1999).
25. Ken-ichi Tanaka and Teruo Shimomura, Estimation of Optimal Error Diffusion for Computer-Generated Holograms, *SPIE Vol.*3491, S. 1017, (1998).
26. Francis T. S. Yu, Recent Advances in Pattern Recognition using Fourier Optics, *SPIE Vol.*3467,S. 50 (July 1998).
27. M. Lehman and M. Garavaglia, Characterization of the fractal properties from the scalar and vectorial point of view, *SPIE Vol.*3467, S. 296 (July 1998).
28. M. Lehman and M. Garavaglia, In-order correlation of transmittances defined cyclically, *SPIE Vol.*3467, S. 288 (July 1998).
29. Alexey V. Konovchuk, Off-axis quadric fractalogram, *SPIE Vol.*3573, S. 580, (1998).
30. Chunfei Li, Guangyu Fang, Luzhong Cai, and Hua-Kuang Liu, Optical grating with wavelength and subwavelength Structures for Optical Limiting, *SPIE Vol.*3467, S. 186 (July 1998).
31. O. V. Angelsky, P. P. Masimyak, P. V. Polyanskii, V. P. Ryabukho, C. Aime, On the ways and frontiers of fractal optics, *SPIE Vol.*3573, S. 572, (1998).
32. M. Srećković, S. Ostojić, J. Mirčevski, N. Bundaleski, Diffraction Effects, Scattering Effects, Analytical Problems, Numerical Algorithms and Program Packages, *SPIE Vol.*3573, S. 584, (1998).
33. M. Bertolotti and C. Sibilìa, Optical properties of quasiperiodic (self-similar) structures, *SPIE Vol.*3405, S. 335, (1998).
34. Emanuel Marom, David Mendlovic and Zeev Zalevsky, Various Approaches for Optical Implementation of the Wavelet Transform, *SPIE Vol.*3405, S. 363, (1998).
35. Wang Aiqin, Jin Yiwen, Complex pattern generation by computer, *SPIE Vol.*3545, S. 139, (1998).
36. Xiong Huilin, Zhang Tianxu, Stable multiresolution feature extraction using translation- and scale-invariant adaptive wavelet transform, *SPIE Vol.*3545, S. 252, (1998).
37. Yuichi Ohta, Kiyohide Satoh, Tomohiko Matsuura, Occlusion Detectable Stereo for 3D Image Media, *SPIE Vol.*3545, S. 46, (1998).
38. Patrick S. P. Wang, 3D Object Understanding from 2D Images, *SPIE Vol.*3545, S. 33, (1998).
39. Neil Carender, David Casasent, Frans Coetzee, and Daming Yu, Hough Transform Computer Generated Holograms: New Output Format, *SPIE Vol.*1555, S. 182, (1991).
40. Y. Owechko, Cascaded-grating holography for artificial neural networks, *Applied Optics*, Vol. 32, No. 8, S. 1380,–(March, 1993).
41. Paul E. Keller and Arthur F. Gmitro, Compute-generated holograms for optical neural networks: on-axis versus off-axis geometry, *Applied Optics*, Vol. 32, No. 8, S. 1304, (March, 1993).
42. Felix P. Shvartsman and Moshe Oren, Photo-lithographic imaging of computer generated holographic optical elements, *SPIE Vol.*1555, S. 71, (1991).
43. Jeffrey Richards, Pieter Vermeulen, Etienne Barnard, and David P. Casasent, Parallel holographic generation of multiple Hough transform slices, *Applied Optics*, Vol. 27, No. 21, S. 4540, (November, 1988).
44. Ch. Frère, D. Leseberg, and O. Bryngdahl, Computer-generated holograms of three-dimensional objects composed of line segments, *J. Optical Society of America*, Vol.3, No. 5, S. 726, (May 1986).
45. H. Stark and E. Garcia, Image Analysis Using Enhanced Spatial Correlation Functions, *Applied Optics*, Vol. 13, No. 8, S. 1828, (August, 1974).
46. О. Браве Избранные научные труды. Кристаллографические этюды. Изд-во «Наука», Л.О., (серия классики науки) 1974г, 419с.
47. Г.С. Мельников, А.А. Ошарин, Модельные и экспериментальные исследования графически-синтезированных голограмм с заданными дифракционными свойствами. Расширенные тезисы доклада на конференции-семинаре ГОИ по «Опике нано-структур», г. Санкт-Петербург, Ноябрь 2004 г.  
[soi.srv.pu.ru/r\\_1251/investigations/fractal\\_opt/data6/conf/exp\\_s2.pdf](http://soi.srv.pu.ru/r_1251/investigations/fractal_opt/data6/conf/exp_s2.pdf)
48. Г.С. Мельников Математический синтез регулярных и фрактальных структур с заданным Фурье откликом. Расширенные тезисы доклада на конференции-семинаре ГОИ по «Опике нано-структур», г. Санкт-Петербург, Ноябрь 2004 г.  
[soi.srv.pu.ru/r\\_1251/investigations/fractal\\_opt/data6/conf/teor\\_s1.pdf](http://soi.srv.pu.ru/r_1251/investigations/fractal_opt/data6/conf/teor_s1.pdf)
49. О.В.Андреева. Предложения к терминологическому словарю по

- оптике. Голография.//Оптический журнал, 2002, т.69, №5, с.87-96.
50. О.В.Андреева Объемные регистрирующие среды для голографии на основе пористого стекла с галлоидным серебром и полимера с фенантренхиноном
  51. А.П. Кушнаренко Исследование спектральных свойств объёмных голограмм с помощью полупроводниковых источников излучения.
  52. А. Быковский "Лишится ли вирус СПИДа своих парадоксов", "Науку и жизнь" № 7, 1990 г. Стр. 62
  53. В. А. Костюченко, В. В. Месянжинов Архитектура сферических вирусов Успехи биологической химии, т. 42, 2002, с. 177—192.  
<http://www.inbi.ras.ru/ubkh/42/kostyuchenko.pdf>
  54. Короленко П.В. Оптика когерентного излучения (Учебное пособие) <http://optics.npi.msu.su/co/toc.html>