



IX Международная конференция “Фундаментальные проблемы оптики”

ФПО-2016

17-21 Октября 2016 года
Санкт-Петербург

Сборник трудов



МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ
ФЕДЕРАЦИИ

САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ
ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ ИНФОРМАЦИОННЫХ
ТЕХНОЛОГИЙ, МЕХАНИКИ И ОПТИКИ

**СБОРНИК ТРУДОВ
IX МЕЖДУНАРОДНОЙ КОНФЕРЕНЦИИ
«ФУНДАМЕНТАЛЬНЫЕ ПРОБЛЕМЫ ОПТИКИ – 2016»**

САНКТ-ПЕТЕРБУРГ
17-21 октября 2016



УНИВЕРСИТЕТ ИТМО

Санкт-Петербург
2016

ББК 22.34. Оптика
УДК 535

Сборник трудов IX Международной конференции «Фундаментальные проблемы оптики – 2016». Санкт-Петербург. 17-21 октября 2016 / Под ред. проф. В.Г. Беспалова, проф. С.А. Козлова.– СПб: Университет ИТМО, 2016. – 537 с.: с ил.

В сборник вошли труды IX Международной конференции «Фундаментальные проблемы оптики – 2016», прошедшей 17-21 октября 2016 года.

ISBN 978-5-7577-0546-0

ББК 22.34. Оптика



УНИВЕРСИТЕТ ИТМО

Университет ИТМО – ведущий вуз России в области информационных и фотонных технологий, один из немногих российских вузов, получивших в 2009 году статус национального исследовательского университета. С 2013 года Университет ИТМО – участник программы повышения конкурентоспособности российских университетов среди ведущих мировых научно-образовательных центров, известной как проект «5 в 100». Цель Университета ИТМО – становление исследовательского университета мирового уровня, предпринимательского по типу, ориентированного на интернационализацию всех направлений деятельности.

© Авторы, 2016

© Университет ИТМО, 2016

ФРАКТАЛЬНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ОБЪЕКТОВ С ПРИРОДОПОДОБНОЙ СТРУКТУРОЙ

Короленко П.В., Логачев П.А., Рыжиков С.Б., Рыжикова Ю.В.

Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова,
физический факультет, Москва, Россия

Определяются фрактальные характеристики аperiодических объектов с природоподобной структурой. Рассматриваются физические подходы к решению фундаментальной проблемы фрактальной оптики, связанной с установлением взаимного соответствия между оптическими характеристиками объектов разной физической природы и их особенностями структурного характера.

Изучение аperiодических объектов с природоподобной структурой является передовым краем современной науки и техники и активно развивается в МГУ имени М.В. Ломоносова. В ходе исследования таких объектов с квазипериодической и аperiодической пространственно-временной структурой выяснилось, что отступление от периодичности приводит к появлению ряда фрактальных свойств, представляющих как общенаучный, так и практический интерес. Характерным примером, доказывающим роль аperiодичности природоподобных объектов, может служить исследование структуры ДНК, к которой применим термин «аperiодический кристалл»[1]. Важное значение в исследовании аperiодических систем подчеркивает экспериментальное открытие, в 1984 году квазикристаллов, обладающих симметрией, запрещенной в классической кристаллографии[2].

В центре внимания в настоящей работе находится фундаментальная проблема современной фрактальной оптики, связанная с установлением общих физических закономерностей, определяющих устойчивую связь между аperiодичностью структуры объектов разной физической природы и фрактальностью их характеристик. О том, что во многих случаях наблюдается такая связь, сообщалось ранее в ходе теоретических и экспериментальных исследований, проводимых в лаборатории когерентной оптики кафедры оптики, спектроскопии и физики наносистем физического факультета МГУ[3]-[4]. Так, например, она реализуется при прохождении лазерного пучка через неоднородную турбулентную среду, которая обладает фрактальной структурой, проявляющейся в разномасштабности вихревых образований с разной энергией[5]. Под влиянием турбулентности в широком диапазоне газокинетических параметров, флуктуации центра тяжести лазерного пучка на выходе из среды приобретают фрактальные признаки, которые оцениваются на основе привлечения фрактальной параметризации и вейвлет-анализа, широко используемых при исследованиях природоподобных объектов разной физической природы[6].

В качестве объектов исследования рассматриваются 1D-2D аperiодические дифракционные решетки квазикристаллического типа, многослойные системы, дендритоподобные нанокластерные структуры, а также случайно-неоднородные турбулентные среды.

Построение многослойных и решетчатых структур производилось на основе использования свойств числовых последовательностей Морса-Туэ, двойного периода, Фибоначчи, Кантора и ее двумерных аналогов[3]-[4]. На Рис. приведены фрагменты структур одномерных и двумерных фрактальных объектов, созданных с использованием свойств множества Кантора и его аналога – прямоугольного ковра Серпинского. В этом случае, начальные уровни анализируемых систем, согласно блочному методу построения, имеют вид: $S_0 = A$; $S_1 = ABA$; $S_2 = ABABBBABA$ и т.д. Переход от более низкого уровня к более высокому производился путем замещения элементов: $A \rightarrow ABA$; $B \rightarrow BBB$. В решетках квазикристаллического типа, 1D-2D матрицы, сформированные на основе указанных выше последовательностей, характеризуют положение рассеивающих центров и свободных вакансий[3],[7].

В многослойных системах закон чередования образующих элементов двух типов A и B , определяет распределение слоев с высоким и низким показателем преломления. Подобные алгоритмы используются и при построении других аperiodических систем, а также их модификаций[7].

Расчет оптических характеристик исследуемых объектов с аperiodической структурой, основывался на нахождении их фурье-образов и спектров отражения многослойных систем с привлечением матричного подхода[8]. Для приведенного коэффициента отражения использовалось логарифмическое представление: $r(\Omega) = -\ln(1 - R)$, где R – коэффициент отражения по мощности, $\Omega = \omega/\omega_0$ – нормированная частота, ω_0 соответствует одинаковым фазовым набегам в слоях. На Рис. приведены оптические характеристики некоторых анализируемых объектов, обладающих выраженной симметрией самоподобия и фрактальными свойствами структуры.

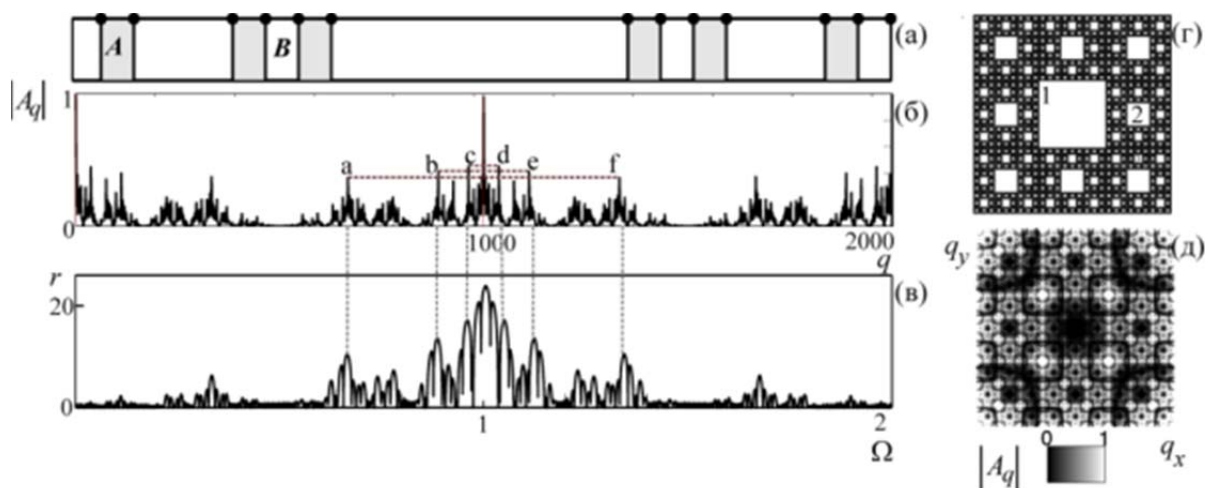


Рисунок. Оптические характеристики фрактальных объектов, построенных на основе свойств числовых множеств Кантора. Фрагменты структур одномерной решетки и многослойной системы Кантора (а), фурье-образ одномерной решетки Кантора (б), спектр отражения многослойной системы Кантора с одинаковыми оптическими толщинами ($J = 243$ слоя, $N_A = 2$, $N_B = 3$, $\Omega = \omega/\omega_0$, где ω – частота падающей волны, ω_0 – нормировочная частота) (в), структура ковра Серпинского (г), распределение амплитуды поля дифракции двумерной решетки $|A_q|$, сформированной на основе ковра Серпинского (д)

Результаты исследований показали, что наиболее устойчивым инвариантом для оценки самоподобия, как структур аperiodических объектов, так и различных их оптических характеристик является коэффициент скейлинга ζ , который определяется отношением самоподобных областей. Например, $\zeta = af/be/cd = 3$ (рис. б). На рис. отношения сторон выделенных квадратных областей (цифрами на рис. г) по принципу большая к меньшей, дают коэффициент скейлинга равный $\zeta = 3$. Коэффициент скейлинга систем Кантора также равен $\zeta = 3$, что следует из общего принципа построения такого рода объектов (рис. а). Аналогично, для других структур квазикристаллического типа были определены инварианты, устанавливающие связь между морфологическими особенностями систем и их оптическими свойствами. Так, для фракталоподобных систем коэффициенты скейлинга $\zeta \approx 1.6$ (объекты Фибоначчи) и $\zeta \approx 2$ (структуры Морса-Туэ и двойного периода).

Количественная оценка самоподобных свойств нанокластерных систем, построенных методом ограниченной диффузией агрегации[9], проявляющихся как в самих структурах, так и в их оптических характеристиках осуществлялась на основе определения «массовой» фрактальной размерности[10]. Результаты моделирования указывают на существование определенной связи между структурными особенностями решетчатых нанокластерных систем дендритного типа и фрактальностью их характеристик, как в картинах дифракции

зондирующего излучения, так и в самих анализируемых объектах. При построении математических моделей учитывалось количество затравок и их взаимное расположение, стохастические свойства движения частиц с периферии, число и положение одновременно выпущенных частиц периферии. Эти факторы оказывали наибольшее влияние на форму конечного пространственного распределения частиц кластера.

Исследование взаимосвязи фрактальных свойств локальных временных флуктуаций фазы и интенсивности в центре лазерного пучка основывалось на привлечении корреляционного и вейвлет-анализа, а также сопоставлении полученных экспериментальных данных с модельной функцией Вейерштрасса[6].

Таким образом, результаты исследования фрактальных свойств в характеристиках различных объектов указывают на дополнительные диагностические возможности фрактальных методов для широкого класса детерминированных и стохастических структур. При этом в качестве идентифицирующих характеристик выступают коэффициенты скейлинга и фрактальные размерности, вычисленные в пределах областей скейлинга. Расчет коэффициентов скейлинга позволяет установить однозначную количественную связь между структурными особенностями исследуемых объектов и фрактальными свойствами взаимодействующего с ними светового излучения. Численное моделирование позволило также выявить существование некоторых объектов, фрактальные свойства которых могут однозначно описываться набором функционально связанных коэффициентов скейлинга, как в самих структурах, так и в их спектральных характеристиках[4]. Существует возможность обобщения полученных результатов на широкий класс природоподобных систем с фрактальной структурой. В частности, имеются предпосылки для использования свойств таких систем в различных областях науки и техники.

Работа выполнена *при финансовой поддержке РФФИ* (гранты 16-32-00386 мол_а, 14-22-01086 офи_м).

1. Э. Шрёдингер, Что такое жизнь? Физический аспект живой клетки. Москва-Ижевск, НИЦ «Регулярная и хаотическая динамика», (2002).

2. Ю.Х. Векилов, М.А. Черников, *УФН*, **180**, №6, 561-586, (2010).

3. P.V. Korolenko, S.B. Ryzhikov, Yu.V. Ryzhikova, *Physics of Wave Phenomena*, **21**(4), 256-260, (2013).

4. В.В. Гридчина, П.В. Короленко, Ю.В. Рыжикова // *Известия РАН. Серия физическая*, **79**, №12, 1691-1694, (2015).

5. А.М. Зотов, П.В. Короленко, Ю.В. Рыжикова // *Сборник тезисов докладов научной конференции «Ломоносовские чтения»*. Секция физики. Москва. Физический факультет МГУ, 5-7, (2016).

6. О.М. Вохник, А.М. Зотов, П.В. Короленко, Ю.В. Рыжикова, *Моделирование и обработка стохастических сигналов и структур*. Учебное пособие. М.: МГУ, (2013).

7. А.М. Зотов, Е.Г. Ким, П.В. Короленко, Ю.В. Рыжикова, *Электромагнитные волны и электронные системы*, **18**, №12, 10-15, (2013).

8. Э.С. Путилин, *Оптические покрытия*. Учебное пособие. СПб., СПбГУ ИТМО, (2010).

9. В.И. Марголин, Л.Ю. Аммон, Д.А. Бабичев, В.С. Фантиков и др. // *Известия академии инженерных наук имени А.М. Прохорова*, № 1, 7-13, (2015).

10. Е. Федер, *Фракталы*. М., Мир, (1991).