

Оптические свойства 1D и 2D аппроксимантов квазикристаллических структур

Ю. В. Рыжикова,* П. В. Короленко,† П. А. Логачев‡
 Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова,
 физический факультет, кафедра оптики и спектроскопии
 Россия, 119991, Москва, Ленинские горы, д. 1, стр. 2

Проведен анализ возможности идентификации 1D и 2D структур квазикристаллического типа (в том числе их аппроксимантов) на основе регистрации локальных паттернов в полях зондирующих пучков, а также дана оценка присутствующих в них структурных дефектов.

PACS: 42.25.Fx; 42.25.Nz.

УДК: 535.015.

Ключевые слова: квазикристаллические структуры, многослойные системы, аппроксиманты, паттерный анализ.

В настоящее время большое внимание уделяется разработке методов оптической диагностики качества сложных оптических элементов, при создании которых используются модели квазикристаллических структур [1, 2]. Ранее сообщалось [2] о перспективности метода, основанного на паттерном анализе свойств зондирующего светового или рентгеновского излучения. Путем регистрации паттернов — отдельных элементов, характерных для скейлинговых характеристик излучения — появляется возможность идентифицировать оптические системы с определенным типом симметрии и определять степень структурных нарушений. Однако в указанной работе не был затронут вопрос о влиянии на формирование паттернов и их форму аппроксимантов, присутствующих в структуре квазикристаллических объектов.

Аппроксиманты структур квазикристаллического типа занимают промежуточное положение между периодическими и аperiodическими системами [3, 4]. Их изучение представляет как общенаучный, так и практический интерес [1, 4, 5].

Целью работы является анализ возможности идентификации такого рода структур (в том числе их аппроксимантов [3]) на основе регистрации локальных паттернов в полях зондирующих пучков, а также проведение оценки присутствующих в них структурных дефектов.

В качестве исследуемых объектов рассматривались 1D – 2D аperiodические решетки, 1D фотонные кристаллы, многослойные системы с метаматериалами и их аппроксиманты разного порядка [2, 3, 6]. Они строились с использованием свойств числовых последовательностей Фибоначчи, Морса–Туэ, двойного периода и Кантора [1, 2]. Эти последовательности могут быть представлены в виде чередующихся в определенном порядке нулей и единиц $\{0, 1\}$. При построении многослойных систем нулевому элементу ставится в соответствие слой с низким показателем преломления, а единичному — с высоким. 2D структуры фор-

мировались на основе различных матричных преобразований [7].

В данной работе проводилось определение структурных особенностей аperiodических объектов и их аппроксимантов на основе паттерного анализа скейлинговых оптических характеристик [2], а также исследование устойчивости выделенных паттернов к изменениям условий освещения и к наличию структурных дефектов.

На основе численного моделирования анализировались картины дифракции и интерференции световых пучков на 1D и 2D объектах и их аппроксимантах. Было установлено, что внутренняя симметрия самоподобия в рассматриваемых квазикристаллических структурах приводит к наличию фрактальных фрагментов (паттернов) в распределении амплитуды поля зондирующего излучения.

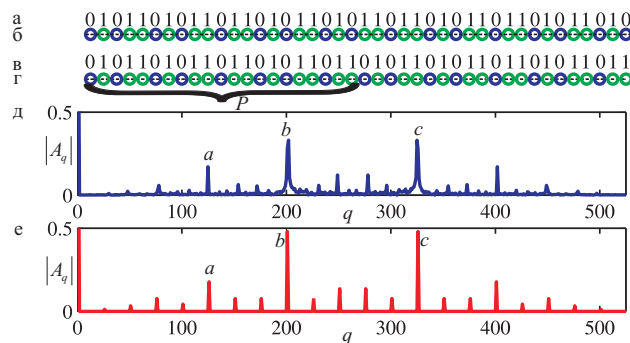


Рис. 1: Скейлинг в фурье-образе 1D решетки Фибоначчи и ее аппроксиманте. Фрагменты числовой последовательности Фибоначчи (а) и ее аппроксиманта S_P с элементарной ячейкой P (в); фрагменты структур решетки Фибоначчи (б) и ее аппроксиманта S_P (г); распределение амплитуды A_q в поле дифракции волны (q — пространственная частота) на решетке Фибоначчи (д) и ее аппроксиманте S_P (е). В качестве локальных паттернов выбрана система пиков на интервалах ab и bc

Рис. 1 иллюстрирует скейлинг в фурье-образе 1D решетки Фибоначчи и ее аппроксиманте S_P с характерной ячейкой $P = 010110101101101011011$ (0 — свободные вакансии, 1 — рассеивающие центры). Фурье-

*E-mail: ryzhikovaju@rambler.ru

†E-mail: pvkorolenko@rambler.ru

‡E-mail: pa.logachev@physics.msu.ru

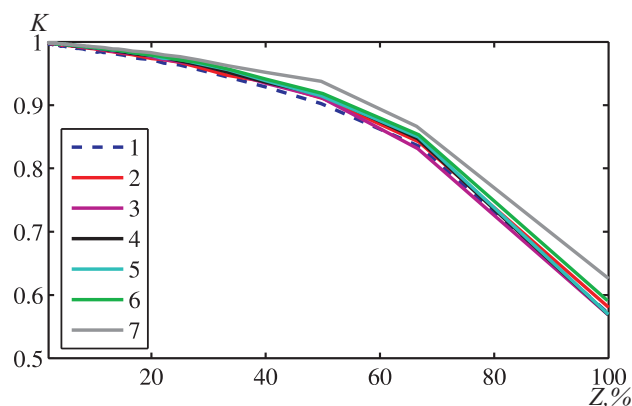


Рис. 2: Средние значения коэффициента взаимной корреляции K распределения амплитуды поля в возмущенных и невозмущенных паттернах 1D решетки Фибоначчи и ее аппроксимантов от степени их рандомизации Z : 1 — структура Фибоначчи; 2 — 7 — аппроксиманты с разной длиной элементарных ячеек: 2 — 101011011010110101101011010110101101011010110101101011010110101101, 3 — 010110101101101011010110101101011011, 4 — 010110101101101011011, 5 — 0101101011011, 6 — 01011011, 7 — 10101.

образ однозначно определяет спектр пропускания 1D фотонного кристалла и картину дифракции на одномерной решетке. Коэффициенты скейлинга ζ в фурье-образе определялись отношением самоподобных элементов в его структуре, например, $\zeta = bc/ab \approx 1, 6$. В частности, расчеты показали, что форма паттерных образований и их геометрические параметры для систем Фибоначчи и их аппроксимантов разного порядка близки между собой.

При внесении дефектов в анализируемые структуры, посредством процедуры рандомизации положения их элементов, наблюдалась весьма высокая устойчивость формы локальных паттернов, регистрируемых в оптических характеристиках зондирующего излучения. Так, на рис. 2 представлена усредненная по ряду реализаций зависимость коэффициента взаимной корреляции K распределения амплитуды светового поля A_q в возмущенных и невозмущенных паттернах от среднего числа замен элементов Z рассматриваемых структур Фибоначчи для $N = 62$ реализаций. Стандартное отклонение значащих точек на рис. 2 не превышало 6%. Вероятность \dot{P} события, состоящего в изменении значения элемента решетки $0 \rightarrow 1$ или $1 \rightarrow 0$, принималась равной $\dot{P} = 0.5$.

Выполненная оценка структурного соответствия пат-

тернов в оптических характеристиках исследуемых структур (в том числе их аппроксимантов) на основе определения коэффициентов скейлинга ζ , кластерной фрактальной размерности и корреляционного анализа [2, 7] доказала свою эффективность. Разработанные алгоритмы расчетов успешно распространены на системы иного типа [8, 9] и согласуются с известными литературными данными.

Таким образом, в настоящей работе установлена высокая степень устойчивости паттернов в оптических характеристиках аперiodических объектов, отличающихся как физической природой, так и геометрическими параметрами к изменению условий освещения и внесению структурных дефектов. Показано, что, несмотря на значительные внешние различия, структуры, принадлежащие к одному классу симметрии, характеризуются одинаковыми скейлинговыми параметрами.

Проведенное исследование указывает на возможность использования паттерного анализа для устойчивой идентификации структур квазикристаллического типа, представляющих собой аппроксиманты разных порядков.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (грант № 14-02-00461 а).

[1] Negro L.D. Optics of Aperiodic Structures — Fundamentals and Device Applications. (CRC Press Taylor & Francis Group, 2014).
 [2] Korolenko P.V., Ryzhikov S.B., Ryzhikova Yu.V. Physics of Wave Phenomena. **21**(4). P. 256. (2013).
 [3] Фаддеев М.А. Вестник Нижегородского университета им. Н.И. Лобачевского. Серия Физика твердого тела. №1. С. 44. (2001).

[4] Дьяченко П.Н., Микляев Ю.В. Компьютерная оптика. №30. С. 23. (2006).
 [5] Дерлугян П.Д. и др. Современные наукоемкие технологии. №9. С. 86. (2013).
 [6] de Medeiros F.F., Albuquerque E.L., Vasconcelos M.S. J. Phys.: Condens. Matter. **18**. P. 8737. (2006).
 [7] Зотов А.М., Ким Е.Г., Короленко П.В., Рыжикова Ю.В. Электромагнитные волны и электронные системы. **18**,

№12. С. 10. (2013).

[8] Домбровская Ж.О., Белокопытов Г.В., Боголюбов А.Н.
Учен. зап. физ. фак-та. Моск. ун-та. №5. 135055. (2013).

[9] Daninthe H., Foteinopoulou S., Soukoulis C.M.
Photonics Nanostruct. Fundam. Appl. 4. P. 123. (2006).

Optical properties of 1D and 2D quasicrystalline structures approximants

Yu. V. Ryzhikova^a, P.V. Korolenko^b, P.A. Logachev^c

Department of Optics and Spectroscopy, Faculty of Physics, Lomonosov Moscow State University. Moscow 119991, Russia
E-mail: ^aryzhikova@rambler.ru, ^bpvkorolenko@rambler.ru, ^cpa.logachev@physics.msu.ru

On the basis of local patterns registration in fields of probing beams the possibility of identifying 1D and 2D quasicrystalline structures (including their approximants) is considered. Influence of structural defects on the shape of pattern formations is investigated.

PACS: 42.25.Fx; 42.25.Hz.

Keywords: quasicrystalline structure, multilayer systems, approximants, pattern analysis.

Сведения об авторах

1. Рыжикова Юлия Владимировна — канд. физ.-мат. наук, старший научный сотрудник; тел.: +7(495) 939-57-40, e-mail: ryzhikova@rambler.ru.
 2. Короленко Павел Васильевич — докт. физ.-мат. наук, профессор; тел. +7(495) 939-57-40, e-mail: pvkorolenko@rambler.ru.
 3. Логачев Павел Андреевич — студент; тел. +7(495) 939-57-40, e-mail: pa.logachev@physics.msu.ru.
-

