

Паттерный анализ устойчивости фрактальных признаков в многослойных системах с метаматериалами

М. Г. Давыдова^{1,*}, П. В. Короленко^{1,2,†}, С. Б. Рыжиков^{1,‡}, Ю. В. Рыжикова^{1,‡}

¹Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова, физический факультет
Россия, 119991, Москва, Ленинские горы, д. 1, стр. 2

²Физический институт имени П. Н. Лебедева Российской академии наук
Россия, 119991, ГСП-1, Москва, Ленинский проспект, д. 53

На основе численного моделирования исследуется устойчивость фрактальных признаков оптических характеристик аperiodических многослойных систем с метаматериалами. Выявлены условия формирования паттерных образований в спектральных характеристиках рассматриваемых систем. Особое внимание уделено оценкам трансформации формы спектров отражения систем различной геометрии с учетом дисперсионных эффектов.

PACS: 68.65.Ac; 42.25.Hz; 42.30.Kq УДК: 535.015

Ключевые слова: аperiodические многослойные системы, метаматериалы, скейлинг, паттерны.

Интерес к изучению многослойных систем (МС) с метаматериалами обусловлен причинами как прикладного, так и общетеоретического характера. Полезные для практики свойства таких систем во многом связаны с наличием запрещенных зон, устойчивых к изменению наклона падающих световых пучков, с возможностью получения эффективных поляриационных делителей, с проявлением туннельных эффектов, позволяющих создавать узкополосные фильтры и широкополосные поглотители [1,2]. МС с чередующимися слоями из диэлектриков и метаматериалов могут обеспечить распространение в них импульсов со сверхсветовой скоростью, а также выполнять функции линзовых систем с высоким разрешением [3].

Несмотря на большое внимание, которое уделено в литературе проявлению фрактальных признаков в многослойных структурах, содержащих метаматериалы, целый ряд вопросов, относящихся к условиям формирования фрактальных признаков, остается неизученным. К этим вопросам, определившим цель настоящей работы, следует отнести прежде всего оценку степени влияния на проявление фрактальных признаков фазовых эффектов (эффекта фазовой компенсации), а также влияние наличия метаслоев на структуру регистрируемых паттерных образований оптических характеристик МС. Требуется также дополнительная проработка вопроса об устойчивости самоподобных свойств спектров пропускания и отражения многослойных структур при различной геометрии исследуемых систем с метаслоями. Указанные вопросы рассмотрены в данной работе путем сравнения характеристик традиционных МС с диэлектрическими слоями и МС с метаматериалами на основе паттерного подхода, предложенного в [4] для оценки фрактальных свойств квазикристаллических решеток. Анализ выполнен на примере аperiodических систем, построенных с использованием одномерных моделей квазикристаллов [4–5].

МС представлялись в виде блоков элементов A и B , чередующихся по определенному закону и соответствующих различным уровням генерации [5]. Так, например, начальные уровни аperiodической системы Фибоначчи задаются $S_0 = B$, $S_1 = A$, $S_2 = AB$. При переходе к более высокому структурному уровню используются правила замещения: $A \rightarrow AB$, $B \rightarrow A$. Величины A , B и порядок их следования определяют в МС чередование слоев с показателями преломления N_A и N_B , соответственно.

В ходе расчетов спектров отражения и пропускания МС использовался известный матричный подход [6]. Для более отчетливого представления деталей спектральных зависимостей применялось логарифмическое представление: $r = -\ln(1 - R)$, где r — приведенный коэффициент отражения, R — коэффициент отражения МС, связанный с коэффициентом пропускания T соотношением $R = 1 - T$.

Наличие метаматериалов существенно усложняет и значительно видоизменяет оптические характеристики МС. Эти изменения могут быть проанализированы на основе паттерного анализа [4], базирующегося на фиксации и определении особенностей отдельных самоподобных элементов (паттернов) в рассматриваемых распределениях. Регистрируя наличие и форму того или иного паттерна, можно судить о пространственных структурных особенностях изучаемых систем, а также о динамике их изменения.

В качестве образца паттерна выбирается один из характерных элементов в самоподобном пространственном спектре анализируемой МС. Причем пространственный спектр многослойной структуры формируется с помощью фурье-преобразования системы дельта-функций с координатами, соответствующими границам образующих слоев квазикристаллической структуры. Следует отметить, что пространственный спектр позволяет выделить характерные для рассматриваемой системы структурные образования — паттерны — используемые для идентификации МС.

В качестве образца паттерна выбирается один из характерных элементов в самоподобном пространственном спектре анализируемой МС. Причем пространственный спектр многослойной структуры формируется с помощью фурье-преобразования системы дельта-функций с координатами, соответствующими границам образующих слоев квазикристаллической структуры. Следует отметить, что пространственный спектр позволяет выделить характерные для рассматриваемой системы структурные образования — паттерны — используемые для идентификации МС.

*E-mail: m_davydova@inbox.ru

†E-mail: pvkorolenko@rambler.ru

‡E-mail: ryzhikovaju@physics.msu.ru

Расчеты проводились в предположении, что слои A выполнены из метаматериала, который в определенном спектральном интервале характеризуется отрицательным показателем преломления. Считалось, что между слоями A находится вакуум. Вакуумные промежутки соответствуют расположению слоев B . Диэлектрическая проницаемость ε и магнитная восприимчивость μ метаматериала задавались в наиболее общем виде с помощью выражений, которые отражают экспериментальные данные и уже использовались в ряде работ при проведении численного моделирования и проверке результатов экспериментов [1,7].

Формулы, описывающие поведение ε и μ , имеют вид

$$\varepsilon_A(f) = 1 + \frac{5^2}{0.9^2 - f^2} + \frac{10^2}{11.5^2 - f^2}, \quad (1)$$

$$\mu_A(f) = 1 + \frac{3^2}{0.902^2 - f^2},$$

где f — частота в ГГц. Кроме соотношения (1) анализировались также другие дисперсионные зависимости, представленные в ряде работ [8,9].

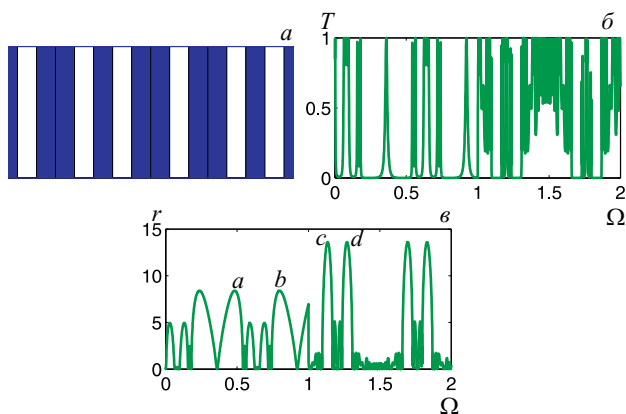


Рис. 1: Оптические характеристики многослойной системы Фибоначчи с метаматериалами (число слоев $J = 32$, синий цвет — слои A). Фрагмент многослойной системы Фибоначчи (a), спектр пропускания $T(\Omega)$ (b) и спектр приведенного коэффициента отражения $r(\Omega)$ (c). Ω — нормированная частота. ab и cd — паттерны структуры с метаслоями и классической диэлектрической системы, соответственно.

При использовании (1) дискретизация изменения величины f производилась с использованием соотношения

$$f_k = 1.5(1 + 0.0033k), \quad (2)$$

где $k = 0 \dots 2000$.

Результаты численного моделирования показали, что дисперсионные эффекты значительным образом влияют как на положение, так и на форму паттерных образований. Для исключения влияния этих эффектов в областях, где показатель преломления положительный или отрицательный, а также в переходной области, рассматривается упрощенная зависимость диэлектрической проницаемости ε_A и магнитной восприимчивости μ_A слоев A от частоты. Для слоев A задавалось $|\varepsilon_A| = 9$, $|\mu_A| = 1$. На рис. 1 представлен пример анализируемой системы Фибоначчи и ее оптических характеристик в случае упрощенной ступенчатой аппроксимации формулы (1). При этом считалось, что слои B выполнены из материала с постоянными значениями $\varepsilon_B = 2.25$ и $\mu_B = 1$ во всей области частот. Параметры окружающей среды принимались равными $\varepsilon = 1$ и $\mu = 1$.

При таком подходе упрощенная дисперсионная модель позволила селективным образом выявить, как на структуру паттернов влияет сам факт присутствия в МС метаслоев. Результаты моделирования показали, что форма паттерных образований в спектральных распределениях обладает высокой степенью устойчивости независимо от присутствия слоев с метаматериалами.

Выполненный анализ показывает, что наличие в рассматриваемых МС слоев из метаматериала может оказывать заметное влияние на проявление скейлинга в их оптических характеристиках, а в некоторых случаях — под влиянием фазовой компенсации даже полностью его подавлять.

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

[1] Daninthe H., Foteinopoulou S., Soukoulis C.M. *Photon. Nanostruct. Fundam. Appl.* **4**. P. 123. (2006).
 [2] Zhang Y., Feng Y., Zhu B., Zhao J., Jiang T. *Opt. Express.* **22**, N 19. P. 22743. (2014).
 [3] Lu D., Liu Z. *Nat. Comm.* **3**. P. 1205. (2012).
 [4] Korolenko P.V., Ryzhikov S.B., Ryzhikova Yu.V. *Phys. Wave Phenom.* **21**(4). P. 256. (2013).
 [5] Macia E. *Rep. Prog. Phys.* **75**. P. 036502. (2012).

[6] Путилин Э.С. *Оптические покрытия*. СПб.: СПбГУИТ-МО. (2010).
 [7] Li J., Zhou L., Chan C. T., Sheng P. *Phys. Rev. Lett.* **90**. P. 083901. (2003).
 [8] Веселого В.Г. *УФН.* **173**, № 7. С. 790. (2003).
 [9] de Medeiros F.F., Albuquerque E.L., Vasconcelos M.S. *J. Phys.: Condens. Matter.* **18**. P. 8737. (2006).

Pattern stability of fractal characteristics in multilayer systems with metamaterials**M.G. Davydova^{1,a}, P.V. Korolenko^{1,2,b}, S. B. Ryzhikov^{1,c}, Yu. V. Ryzhikova^{1,c}**¹*Faculty of Physics, Lomonosov Moscow State University. Moscow 119991, Russia*²*P.N. Lebedev Physics Institute, Russian Academy of Sciences. Moscow 119991, Russia**E-mail: ^am_davydova@inbox.ru, ^bpvkorolenko@rambler.ru, ^cryzhikovaju@physics.msu.ru*

By numerical simulation the stability of fractal characteristics in the optical characteristics of aperiodic multilayer systems with metamaterials is investigated. The conditions of pattern formations in the spectral characteristics of the analyzed systems are identified. Particular attention is given to the estimation of transformation form of the reflection spectra of systems with different geometry and taking into account dispersion effects.

PACS: 68.65.Ac; 42.25.Hz; 42.30.Kq

Keywords: aperiodic multilayer systems, metamaterials, scaling, patterns.

Received 27.07.2015.

Сведения об авторах

1. Давыдова Мария Геннадьевна — студент кафедры оптики, спектроскопии и физики наносистем; тел.: +7 (495) 939-57-40, e-mail: m_davydova@inbox.ru.
2. Короленко Павел Васильевич — докт. физ.-мат. наук, профессор кафедры оптики, спектроскопии и физики наносистем; тел. +7 (495) 939-57-40, e-mail: pvkorolenko@rambler.ru.
3. Рыжиков Сергей Борисович — докт. пед. наук, канд. физ.-мат. наук, доцент кафедры общей физики; тел.: +7 (495) 939-14-89, e-mail: sbr@physics.msu.ru.
4. Рыжикова Юлия Владимировна — канд. физ.-мат. наук, старший научный сотрудник кафедры оптики, спектроскопии и физики наносистем; тел.: +7 (495) 939-57-40, e-mail: ryzhikovaju@physics.msu.ru.