

## ОСОБЕННОСТИ СПЕКТРАЛЬНЫХ И СКЕЙЛИНГОВЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ОПТИЧЕСКИХ ЭЛЕМЕНТОВ С АПЕРИОДИЧЕСКОЙ СТРУКТУРОЙ

Ю.В. Рыжикова, П.В. Короленко, А.Ю. Мишин,  
*Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова*

*ryzhikovaju@rambler.ru*

Проведён сравнительный анализ спектральных и скейлинговых характеристик детерминированных апериодических дифракционных решёток (АДР) и апериодических многослойных структур (АМС). Рассмотрены три вида указанных оптических элементов. К первому виду относятся элементы с фрактальной структурой; ко второму – элементы, которые не являются в строгом смысле фракталами, но обладают определённой симметрией самоподобия; наконец, элементы третьего вида имеют специфическую апериодическую структуру, исключая проявление самоподобия.

Цель анализа, основанного на численном моделировании, состоит в выяснении, как принадлежность устройств к тому или иному виду сказывается на их спектральных и скейлинговых свойствах. Наряду с общетеоретической проблемой, относящейся к установлению количественной связи между самоподобием в структуре элементов и скейлингом в их оптических характеристиках, рассматриваются некоторые практические вопросы, связанные с применением апериодических устройств.

В ходе моделирования структуры амплитудных АДР и диэлектрических АМС применялись подходы, основанные на использовании свойств канторовского множества, а также числовых последовательностей Морса-Туэ, двойного периода и Фибоначчи [1]. Кроме того, были использованы специальные функции [2], позволяющие генерировать разнообразные апериодические распределения. В пределах одного вида закон чередования слоёв с высоким и низким показателями преломления в АМС совпадал с законом чередования малых и больших промежутков между щелями амплитудных АДР. Считалось, что на АДР и АМС падают по нормали плоские однородные волны. Для определённости полагалось, что показатели преломления слоёв могли принимать два значения:  $N_A = 2$ ,  $N_B = 3$ . Рассматривались два случая. В первом – фазовые набег в образующих слоях считались одинаковыми, во втором – одинаковой считалась физическая толщина слоёв.

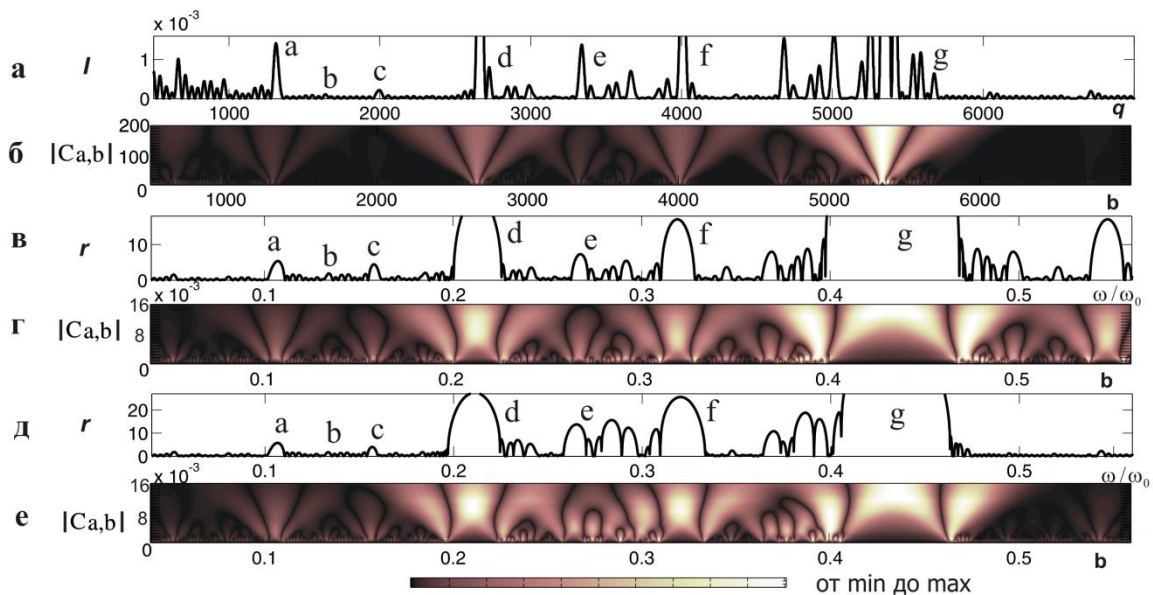
Для оценки скейлинга в характеристиках оптических элементов использовалось понятие кластерной (массовой) фрактальной размерности [3]. Размерность определялась по отношению как к распределению

амплитуды в картинах дифракции света на АДР, так и к спектрам отражения от АМС. При расчёте картины дифракции использовалось фурье-преобразование их структуры, а при определении спектральных характеристик АМС применялся матричный формализм. Для более наглядного представления формы и глубины запрещённых зон в спектрах АМС рассчитывалась зависимость от частоты приведённого коэффициента отражения, равного  $r = -\ln(1 - R)$ , где  $R$  – коэффициент отражения.

Было установлено, что в случае классической триадной канторовской модели, реализующей элементы 1-го вида, картина дифракции на АДР и спектры отражения от АМС имеют чётко выраженные фрактальные признаки, причём их кластерные размерности  $D$  оказываются близкими к топологической размерности канторовского множества ( $D \approx 0,63$ ).

Важным, ранее не отмечающимся в литературе свойством рассматриваемых элементов второго вида (они строились на базе числовых последовательностей Морса-Туэ, двойного периода и Фибоначчи), является то, что внутреннему коэффициенту скейлинга, отражающему симметрию самоподобия в их структуре, оказываются весьма близки значения кластерной фрактальной размерности, оцениваемой в области расположения самоподобных фрагментов в графиках их оптических характеристик. Для систем Морса-Туэ и двойного периода коэффициент скейлинга  $\zeta$  равен  $\zeta = 2$ , а для систем Фибоначчи он равен коэффициенту золотого сечения ( $\zeta = \Phi$ ). В качестве примера проведенного анализа приведем спектральные характеристики АМС двойного периода (рис. 1).

Рис. 1. Спектральные характеристики АМС двойного периода (256 слоев). а –



распределение интенсивности  $I$  в поле дифракции, в – спектр отражения АМС с одинаковыми фазовыми набегам в слоях, д – спектр отражения АМС с одинаковыми толщинами слоев, б, г, е – картины вейвлет-коэффициентов  $|C_{a,b}|$  распределений а, в, д.

На имеющее место структурное соответствие формы распределения интенсивности в поле дифракции и спектров отражения света от АМС указывают буквенные обозначения основных максимумов распределений. Обращает на себя внимание близость формы спектров отражения систем, представленных на рис. 1, в, д. Это подтверждают оценки их коэффициентов корреляции для самоподобных областей. Так, рассчитанные для этих областей значения коэффициентов корреляции спектров отражения равны:  $K = 0,95$  (для системы Морса-Туэ),  $K = 0,91$  (для системы двойного периода) и  $K = 0,9$  (для системы Фибоначчи).

Для структур Морса-Туэ и Фибоначчи совпадение размерностей поля дифракции и спектров АМС выполняется с точностью до 4%, а для структуры двойного периода – с точностью до 12%.

Структурное соответствие анализируемых распределений подтвердили также расчеты глобальных спектров энергии, меры локальной перемежаемости и контрастности [4], полученные на основе расчета картин значений вейвлет-коэффициентов  $|C_{a,b}|$ . Для вейвлет-анализа использовалась вейвлетообразующая функция «мексиканская шляпа».

Что касается оптических элементов третьего вида, то, как показали расчеты, они не обладают ни признаками самоподобия, ни скейлингом в оптических характеристиках. Тем не менее их оптические характеристики при определенных структурных параметрах могут оказаться полезными в практическом отношении. Так, в некоторых случаях АМС данного вида могут обеспечить эффективное отражение, как в широком спектральном интервале, так и в широком диапазоне углов падения.

Таким образом, выполненный в рамках данной работы анализ показывает, что аперидические системы являются весьма интересным в физическом отношении объектом исследования, позволяющим заметно углубить представления современной фрактальной оптики. В то же время в силу своих уникальных характеристик они могут существенно расширить и по многим показателям улучшить элементную базу разнообразных оптических систем.

## ЛИТЕРАТУРА

1. А.М. Зотов, П.В. Короленко, А.Ю. Мишин // Кристаллография. 2010. Т.55. № 8. С. 965.
2. E.M. Nascimento, F.A.V.F. de Moura, M.L. Lyra // Photonics and nanostructures-fundamentals and applications. 2009. V. 7. P. 101.
3. Е. Федер. «Фракталы». М.: Мир, 1991.
4. Н.М. Астафьева. // Успехи физических наук, 1996, т. 166, №11, с. 1135.