

УДК 535.8

АПЕРИОДИЧЕСКИЕ МНОГОСЛОЙНЫЕ СТРУКТУРЫ: СВОЙСТВА И ПРИМЕНЕНИЯ

Н. В. Грушина¹, А. М. Зотов, А. Ю. Мишин, Ю Мин

*Физический факультет Московского государственного университета
им. М. В. Ломоносова,
119991, Москва, Россия, Ленинские горы, д. 1 стр. 2;
кафедра оптики и спектроскопии*

На основе расчета характеристик аперiodических многослойных структур сформулированы предложения по практическому применению многослойных аперiodических структур в лазерных зеркалах, оптических переключателях (логических элементах), фазовых модуляторах. Эти предложения базируются на многопараметрической оптимизации свойств аперiodических структур и учитывают новые современные технологические возможности их изготовления, включающие, в частности, возможности нанотехнологий.

Ключевые слова: *аперiodические многослойные структуры, лазерные зеркала, оптические переключатели, фазовые модуляторы.*

Наряду с периодическими многослойными структурами (МС), широко используемыми в разнообразных оптических устройствах, нашли применение также аперiodические МС [1]. Очень часто аперiodические МС строятся в соответствии с суммационным принципом Фибоначчи [1, 2]. Основное их отличие от периодических МС состоит в наличии в спектрах пропускания не одной, а целой системы запрещенных зон (зон

¹e-mail: natasha_grushina@mail.ru

с близким к нулю коэффициентом пропускания). Сравнение спектров пропускания периодической и аperiodической МС с чередующимися показателями преломления слоев $N_{\min} = 1.46$ и $N_{\max} = 2.35$ проведено на рис. 1. Присутствие в спектрах пропускания нескольких запрещенных зон приводит к появлению ряда особенностей, связанных с прохождением через них оптического излучения.

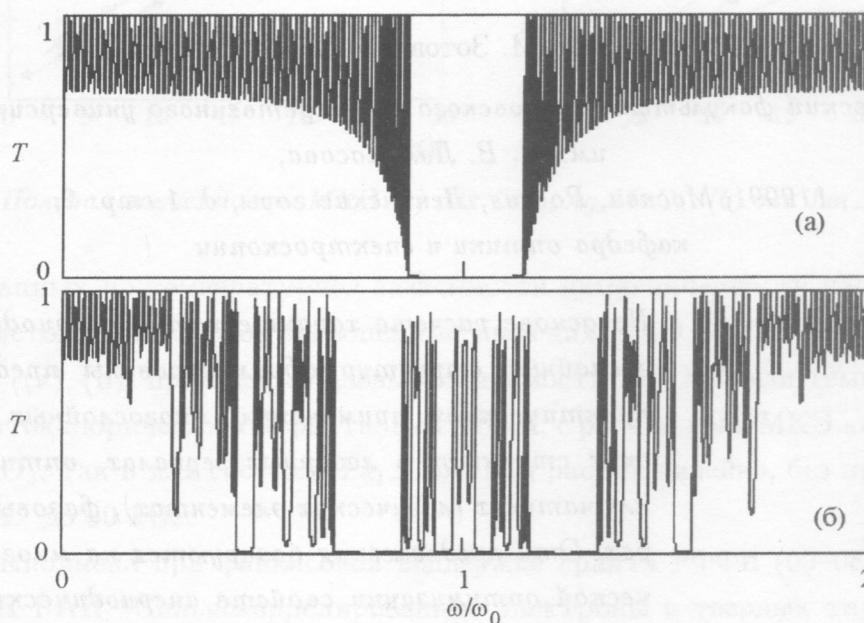


Рис. 1. Зависимость коэффициентов пропускания периодической (а) и аperiodической (б) МС из 144 слоев от частоты излучения (ω_0 – частота, при которой оптическая толщина слоев в отсутствие управляющего сигнала равна четверти длины волны).

Целью данной работы является изучение возможности практического использования этих особенностей для создания нового класса оптических элементов на базе современных технологий, которые позволяют создавать МС, насчитывающие несколько сот слоев. Примером таких технологий может служить изготовление наноструктурированных МС на основе пористого кремния [3]. Среди практических приложений рассмотрено использование аperiodических МС Фибоначчи в лазерных зеркалах, оптических переключателях, фазовых модуляторах.

1. Использование различных типов аperiodических многослойных покрытий в *отражающих зеркалах лазеров* (включая лазеры с вертикальным резонатором на квантовых точках) позволяет осуществлять гибкую селекцию частот генерации. Действительно,

если в резонаторе применяются два периодических зеркала, то при достаточной ширине рабочей линии размещенного в резонаторе активного вещества будет генерироваться излучение, многочисленные спектральные компоненты которого будут располагаться в интервале между частотами ω_{01} и ω_{02} , определяющем ширину запрещенной зоны (рис. 2(а)). При использовании комбинации из периодического и аperiodических зеркал генерируется излучение лишь на частотах, которым одновременно соответствует высокий коэффициент отражения на одном и другом зеркалах. Из рис. 2(б) видно, что условие генерации выполняется лишь для двух частот ω_1 и ω_2 . Такого рода двухчастотный режим часто используется в лазерных интерферометрах и лазерных метрологических устройствах.

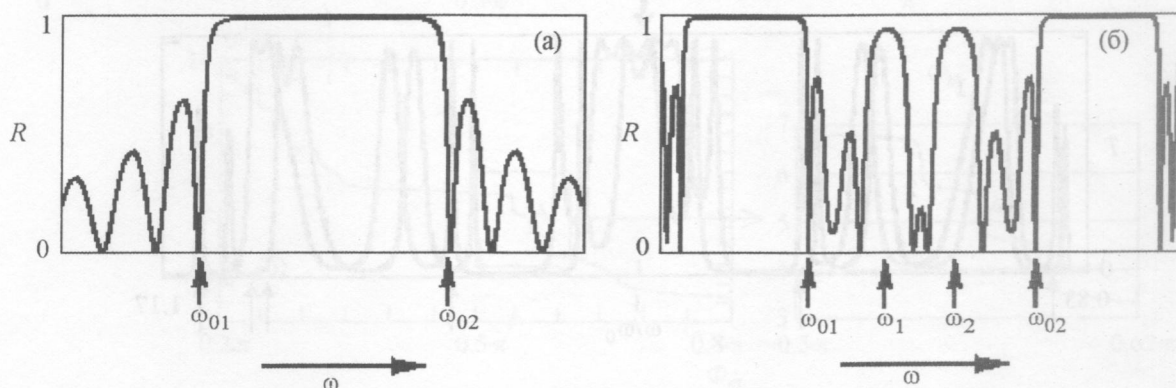


Рис. 2. Зависимость коэффициентов отражения многослойного периодического (а) и аperiodического (МС Фибоначчи, 18 слоев) (б) покрытий от частоты излучения.

2. Анализ и оптимизация характеристик *оптических переключателей* (логических элементов [4]) осуществлялись на основе решения самосогласованной задачи о прохождении излучения через четвертьволновую МС (т.е. МС, в каждом слое которой фазовый набег волны составляет без внешнего воздействия $\lambda/4$), часть слоев которой меняла свой показатель преломления в зависимости от интенсивности управляющего сигнала. Использовалась следующая зависимость показателей преломления от интенсивности I : $n = n_0 + n_2 I$. При включении управляющего сигнала меняются коэффициенты пропускания пробных сигналов, что дает возможность управлять их прохождением через МС. Особенность МС Фибоначчи состоит в том, что она обеспечивает многоканальный режим переключателя. В процессе оптимизации свойств многоканальных переключателей выбирались необходимые частоты управляющего сигнала и геометрические параметры МС. На рис. 3 показаны рассчитанные спектры пропускания

симметричной структуры Фибоначчи ($n_2 = 0.004 \text{ см}^2/\text{Вт}$, интенсивность управляющего сигнала на входе $I_{\text{упр}} = 10 \text{ Вт}/\text{см}^2$) в отсутствие управляющего сигнала (кривая 1) и при его включении (кривая 2). Верхняя стрелка определяет значения частоты управляющего сигнала, нижние стрелки определяют частоты пробных сигналов. Из рис. 3 видна высокая эффективность управления переключением пробных сигналов на целом ряде частот. Численное моделирование показало, что работа многоканального переключателя во многом зависит от правильности выбора мощности управляющего сигнала и характеристик “нелинейных” слоев. Так, в частности, чрезмерное увеличение мощности управляющего сигнала (или коэффициента n_2) может приводить к развитию автоколебательной неустойчивости.

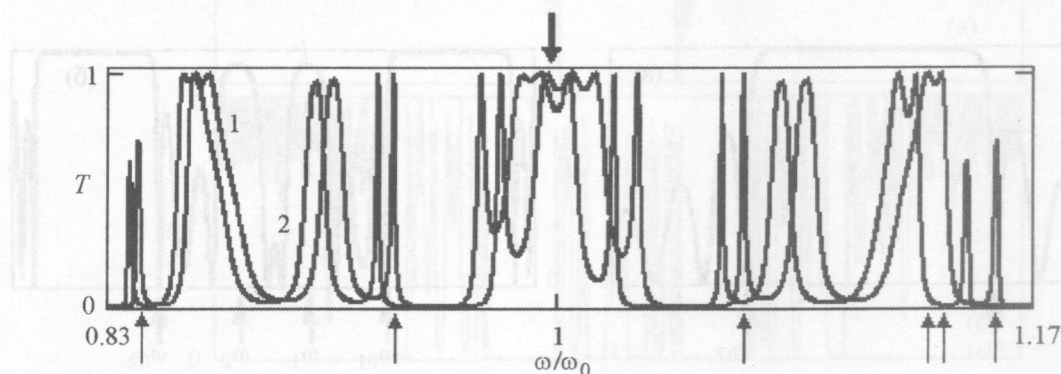


Рис. 3. Зависимости коэффициента пропускания МС Фибоначчи из 110 слоев от частоты излучения в отсутствие управляющего сигнала (кривая 1) и при его включении (кривая 2). $N_{\min} = 1.45$ и $N_{\max} = 3.3$. Верхняя стрелка – частота управляющего сигнала.

3. Проблема высокоэффективных *фазовых модуляторов* рассмотрена в настоящей работе применительно к МС, обладающим практически полным отражением при разных углах падения и в широком спектральном интервале. Такое отражение несложно осуществить, внося небольшое линейное изменение (тренд) в толщины слоев. При наличии такого тренда фазовые набеги в слоях описываются выражением $\Phi = \alpha + k(j-1)$, где j – номер слоя; α – фазовый набег в первом слое. Коэффициент k , характеризующий увеличение толщины слоев с ростом j , удобно задать в виде $k = \left(\frac{\pi}{2} - \alpha\right) \cdot \frac{2}{J}$, где J – число слоев в системе. При $\alpha = \pi/2$ фазовые набеги в слоях будут одинаковыми и равными $\pi/2$ (случай четвертьволновой системы). Варьируя α , можно найти оптимальное значение k , обеспечивающее максимальную ширину спектральной области с максимальным отражением при разных углах падения. Выполненные оценки показали,

что наилучший результат достигается при $\alpha = \frac{\pi}{2} \cdot 0.65$ независимо от числа J слоев в системе. Тренд в толщинах слоев при таком значении α приводит к значительному уширению спектрального интервала с высоким отражением. Возможен тренд как на увеличение Φ , так и на его уменьшение.

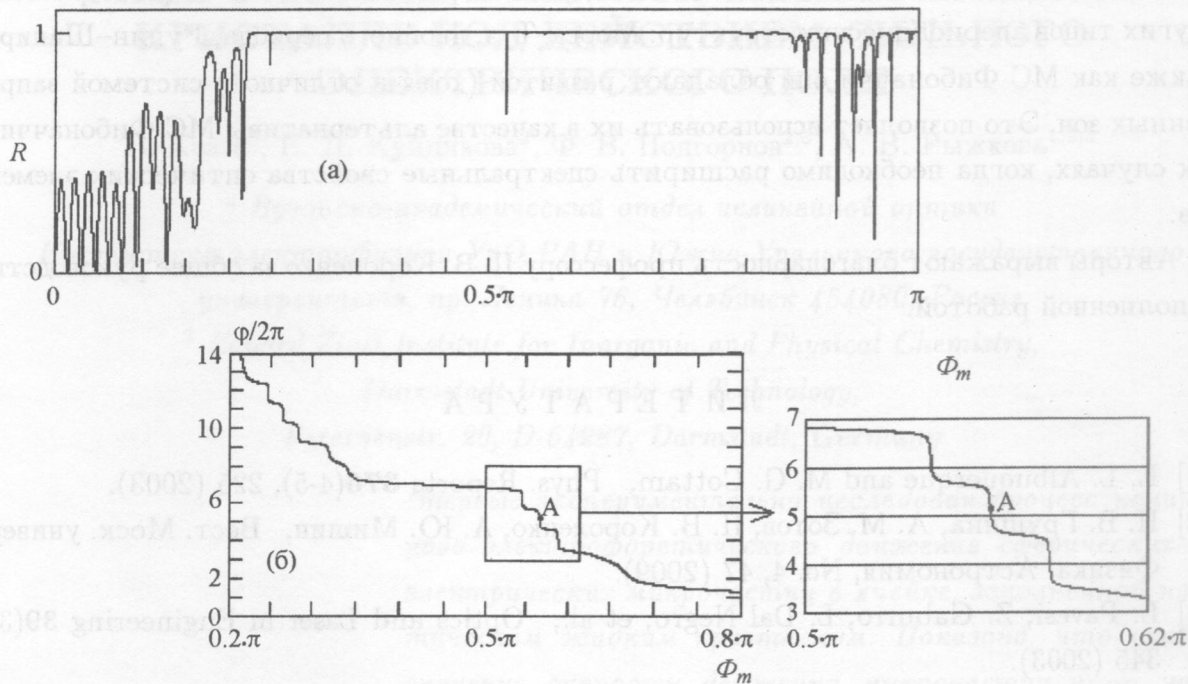


Рис. 4. (а) – график зависимости коэффициента отражения МС из 55 слоев от среднего фазового набега в слое Φ_m ; (б) – зависимость изменения фазы отраженной волны от среднего фазового набега в слое. $N_{\min} = 1.46$ и $N_{\max} = 3.58$.

Было обнаружено, что апериодические МС, построенные по такому принципу, обладают в области высоких значений коэффициента отражения спектральными интервалами с большой производной фазы отраженной волны по $\Phi_{\text{среднему}}$ (Φ_m). Осуществляя изменение толщин слоев с использованием акустических или электрооптических эффектов, можно осуществлять в этих спектральных интервалах эффективную модуляцию фазы без изменения интенсивности отраженного сигнала.

На рис. 4 показан спектр отражения от МС с 55 слоями (тренд на уменьшение толщин слоев), сопряженный с графиком изменения фазы отраженной волны. Из рисунка хорошо видно, что эти области находятся в пределах диапазона практически полного отражения. Точка А на графике изменения фазы соответствует наиболее крутому участку. Если эту точку использовать в качестве рабочей, то небольшие изменения

фазовых набегов в толщинах слоев приведут к весьма существенным изменениям фазы отраженной волны. Если ориентироваться на изменение толщин слоев в 0.1%, то для указанной рабочей точки изменение фазы отраженного сигнала будет достигать значения, равного π .

В ходе выполнения данной работы были рассмотрены оптические характеристики других типов апериодических структур: Морса–Туэ, двойного периода, Рудин–Шапиро. Также как МС Фибоначчи они обладают развитой (хотя и отличной) системой запрещенных зон. Это позволяет использовать их в качестве альтернативы МС Фибоначчи в тех случаях, когда необходимо расширить спектральные свойства оптических элементов.

Авторы выражают благодарность профессору П. В. Короленко за общее руководство выполненной работой.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] E. L. Albuquerque and M. G. Cottam, Phys. Reports **376**(4-5), 225 (2003).
- [2] Н. В. Грушина, А. М. Зотов, П. В. Короленко, А. Ю. Мишин, Вест. Моск. универ. Физика. Астрономия, No. 4, 47 (2009).
- [3] L. Pavesi, Z. Gaburro, L. Dal Negro, et al., Optics and Laser in Engineering **39**(3), 345 (2003).
- [4] В. Н. Васильев, В. Г. Беспалов, в сб. статей “Проблемы когерентной и нелинейной оптики” под ред. И. П. Гурова, С. А. Козлова (СПб., СПбГИТМО(ТУ), 2000), с. 88.

По материалам 3 Всероссийской молодежной школы-семинара “Инновационные аспекты фундаментальных исследований по актуальным проблемам физики”, Москва, ФИАН, октябрь 2009 г.

Поступила в редакцию 3 ноября 2009 г.