

## Распространение плоской электромагнитной волны через цилиндрический метаматериал конечной длины в модели молекулярной оптики\*

Б.Б. Авербух<sup>1</sup>, И.Б. Авербух<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Тихоокеанский государственный университет, г. Хабаровск, Россия

Среда скомпонована из плоскопараллельных монослоев, состоящих из элементов Гюйгенса. Рассмотрен цилиндр из конечного числа монослоев (т.е. конечной длины). Получены выражения для отраженного поля, поля в цилиндре и за цилиндром. При определенных условиях такая среда может вести себя как оптическое магнитное зеркало, усиливая падающее на нее излучение. Рассмотрено преобразование электромагнитного излучения зонной пластинкой Френеля и состоящими из электрических диполей радиальной и секториальной зонными пластинками толщиной в один монослой.

**Ключевые слова:** молекулярная оптика, метаматериал, цилиндр конечной длины, стержень, монослой дптолей, элементы Гюйгенса, оптическое магнитное зеркало, радиальная и секториальная зонные пластинки.

### Введение

Метаматериалы обычно представляют собой системы резонансных включений во вмещающей их диэлектрической матрице. Формы включений могут быть различными (диск [1, 2], куб [3], сфера [4], пирамида [5] и др.). Размеры включений предполагаются много меньшими длины волны излучения  $\lambda$ . Экспериментально такие среды создаются, например, в виде слоистых сред.

Задача о распространении электромагнитного излучения в такой среде обычно рассматривается макроскопически в рамках классической электродинамики, исходя из уравнений Максвелла. Среда характеризуется эффективными значениями диэлектрической  $\epsilon$  и магнитной  $\mu$  проницаемостей или показателем преломления [1, 2, 6]. Параметры включений определяются их размерами, формой и рабочей частотой. Широко используются численные методы.

Но теория оптических явлений, построенная на уравнениях Максвелла, не объясняет появление отраженной и преломленной волн. Применение численных методов оставляет скрытыми детали физических процессов при формировании этих волн. Механизм формирования отраженной и преломленной волн дает только микроскопический анализ. В молекулярной оптике среда – это вакуум, в котором находятся атомы вещества, моделируемые в простейшем случае диполями. Под действием внешнего поля эти диполи излучают когерентные электромагнитные волны. Интерференция этих волн определяет структуру электромагнитного поля в среде, перед ней и за ней.

Формирование отраженных и преломленных волн при распространении электромагнитного излучения в метаматериале в модели молекулярной оптики рассмотрено в [7, 8]. Среда считалась полубесконечными или конечными в продольном направлении и бесконечными в поперечных. В данной работе на основе микроскопического подхода рассмотрено распространение электромагнитного излучения через среды с конечными размерами. В частности, цилиндр конечной длины (в этом случае аналитическое решение Ми отсутствует [9]). Рассмотрены также круговые зонные пластинки (Френеля, радиальная и секториальная с фазой Панчаратнама – Берри) на основе метаматериалов толщиной в один монослой. Подобные структуры представляют большой интерес, в частности, с точки зрения создания на их основе различных приборов и устройств [10–12].

### Случай цилиндрического стержня

Пусть среда – это цилиндр с осью  $z$  и радиусом основания  $R$ , составленный из плоскопараллельных монослоев. Монослои состоят из элементов Гюйгенса и лежат в плоскостях  $x_0$ , пересекающих ось  $z$  в точках  $z_1, z_2, z_3, \dots$ . Расстояния между монослоями по оси  $z$  одинаковы и равны  $a$ , причем  $a \ll \lambda$ . Элементы Гюйгенса – это частицы с электрической ( $A_d = A_d' - iA_d''$ ) и магнитной

\* Работа выполнена при поддержке Минобрнауки РФ, дополнительное соглашение от 1 июня 2021 г. № 075-02-2021-1389, дополнительное соглашение с Минобрнауки России от 4 февраля 2022 г. № 075-02-2022-879. Соглашение от 16.02.2023 г. № 075-02-2023-932. Соглашение от «28» февраля 2024 г. № 075-02-2024-1432.