

# Рассеяние электромагнитного излучения системой из трех диэлектрических цилиндров конечной длины

И. А. Мазайло, В. А. Ковтун-Кужель, А. П. Самородов, Д. В. Хацук

*Гродненский государственный университет им. Янки Купалы, Гродно, Беларусь;*  
*e-mail: vkovtun@grsu.by*

На базе формализма объемного интегрального уравнения (ФОИУ) проведено численное моделирование функций углового распределения индикатрис рассеяния системы из трех диэлектрических цилиндров конечной длины. Изучена зависимость угловых характеристик от оптико-геометрических параметров. Установлено, что электродинамическое взаимодействие между цилиндрами приводит к существенному отличию углового распределения излучения, рассеянного этой системой, от углового распределения излучения, рассеянного тремя электродинамически не связанными цилиндрами.

**Ключевые слова:** конечный цилиндр, электродинамическое взаимодействие, дифракционный параметр.

## Введение

Значительные перспективы в развитии элементной базы оптики, лазерной физики и радиофизики связывают с использованием дисперсных частично-упорядоченных структур, в которых масштаб упорядоченности определяет характерные проявления коллективных электродинамических взаимодействий [1]. В настоящей работе ФОИУ применен для оценки взаимного влияния трех параллельных диэлектрических цилиндров конечной длины на угловое распределение рассеянного ими излучения. Рассматривается случай, когда линейно поляризованное излучение падает вдоль оси цилиндров.

## 1. Метод расчета

Формализм объемного интегрального уравнения (ФОИУ) базируется на интегральном представлении поля в любой точке пространства как вне, так и внутри частицы [2]:

$$\mathbf{E}(\mathbf{r}_1) = \mathbf{E}^{\text{in}}(\mathbf{r}_1) + k^2/(4\pi) \iiint [m^2(\mathbf{r}_2) - 1] \mathbf{E}(\mathbf{r}_2) \mathbf{G}^0(\mathbf{r}_1, \mathbf{r}_2) d^3\mathbf{r}_2, \quad (1)$$

где  $\mathbf{E}$  – напряженность электрического поля в рассматриваемой точке;  $\mathbf{E}^{\text{in}}$  – напряженность электрического поля падающей волны;  $m$  – комплексный показатель преломления частицы;  $k$  – волновой вектор,

$\Gamma = \frac{k^2}{4\pi} (m^2 - 1) \mathbf{G}$  – тензорная функция Грина.

Процедура перехода от интегрирования по всей рассматриваемой области к суммированию предполагает представление этой области в виде ансамбля элементарных ячеек одинаковой кубической формы. Конечный вклад вносят ячейки с относительным показателем преломления, отличным от единицы. Показатель преломления вещества и электрическое поле внутри каждой элементарной ячейки считаются постоянными. Уменьшение объема элементарных ячеек увеличивает точность расчета характеристик частицы.

Будем далее рассматривать систему, состоящую из трех одинаковых параллельных друг другу диэлектрических цилиндров конечной длины  $l$  с диаметром  $d$ . Расположим оси цилиндров параллельно оси  $OZ$  и будем считать, что падающая на цилиндры линейно-поляризованная вдоль оси  $OY$  волна распространяется также вдоль оси  $OZ$ . Поместим центр первого цилиндра в начало декартовой системы координат, а центры двух других разместим на некотором расстоянии  $L$  по оси  $OX$ . Как уже упоминалось, решение уравнения (1) позволяет найти напряженности электрического

поля в каждой элементарной ячейке исследуемого объекта. Когерентное переоблучение между диэлектрическими цилиндрами, составляющими рассматриваемую систему, приводит к тому, что картина распределения полей внутри каждой из трех взаимодействующих частиц отличается от случая, когда эти частицы рассеивают излучение независимо друг от друга и взаимодействие между ними отсутствует. После определения напряженности электрического поля в каждой элементарной ячейке можно найти соответствующие ортогональным поляризациям амплитудные функции рассеяния  $S_1(\theta)$  и  $S_2(\theta)$  для интересующих нас объектов.

Расчет индикатрис рассеяния  $I(\theta)$  из амплитудных функций рассеяния проводился далее с использованием соотношения  $I(\theta) = |S(\theta)|^2 / \pi r^2 Q_{sca}$ , где  $Q_{sca}$  и дифракционный параметр  $r$  соответствуют рассматриваемому объекту.

## 2. Обсуждение результатов исследования.

На рисунке 1 представлены функции углового распределения интенсивности рассеяния (ФУРИР) для объектов, состоящих из трех параллельных одинаковых цилиндров конечной длины. Характеристики рассеяния рассматриваются при  $\lambda = 400$  нм,  $n_c = 1.73$ . Расстояние между осями частиц в рассматриваемой системе  $L$  составляло от 120 нм до 200 нм. Геометрические размеры каждого из цилиндров определялись параметрами  $d = 100$  нм,  $l = 1500$  нм.

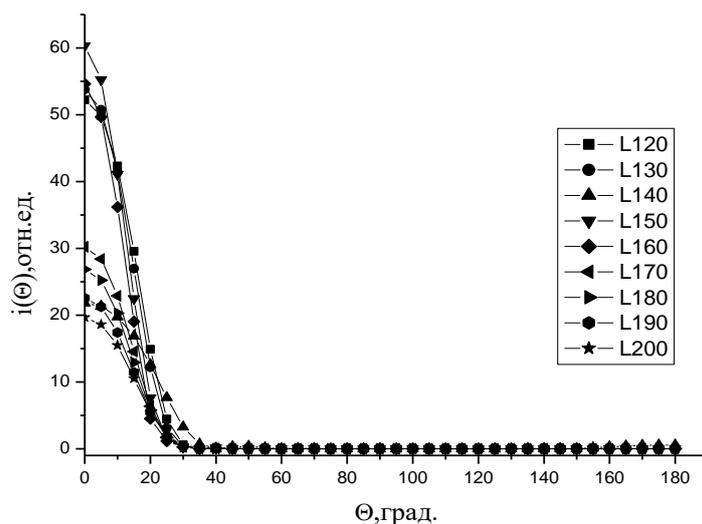


Рис. 1. – Функции углового распределения интенсивности рассеяния системы из трех цилиндров конечной длины с  $n = 1.73$ ,  $\lambda = 400$  нм,  $L$  от 120 нм до 200 нм.

Как видно из рис. 1, при увеличении расстояния от 120 нм до 200 нм в системе из трех цилиндров изменяется угловая структура ФУРИР. При увеличении расстояния между частицами от 120 нм до 200 нм наблюдается смещение главного минимума в область меньших углов от  $30^\circ$  до  $22^\circ$ . Дополнительные экстремумы отсутствуют.

На рис. 2 представлена зависимость функции углового распределения интенсивности рассеяния системы из трех цилиндров конечной длины от расстояния  $L$ . Интенсивность излучения, рассеянного строго в направлении вперед при изменении расстояния от 120 нм до 200 нм в системе из трех цилиндров изменяется немонотонно. А именно, наибольшее значение функции углового распределения интенсивности рассеяния определено расстояниями между частицами  $L = 130$  и  $150$  нм. Минимальное значение  $L$  принимает при  $140$  нм. При увеличении расстояния между цилиндрами от  $150$  нм и далее зависимость функции углового распределения интенсивности рассеяния

от расстояния  $L$  уменьшается. Это явление объясняется уменьшением ближнеполевых взаимодействий и коллективных эффектов когерентной природы между исследуемыми частицами.

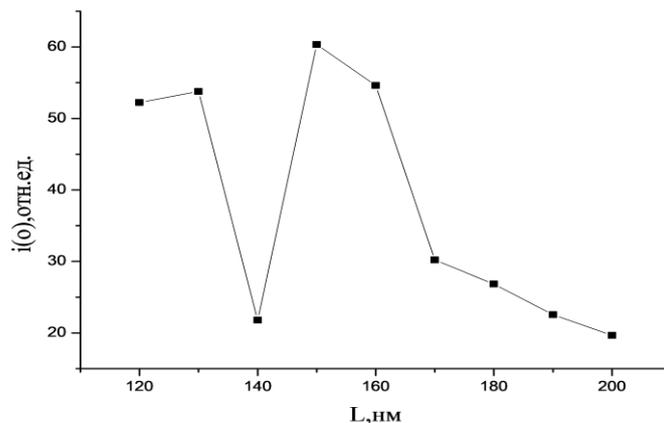


Рис. 2. – Зависимость функции углового распределения интенсивности рассеяния системы из трех цилиндров конечной длины от расстояния  $L$ .

### Заключение

Проведенные численные исследования углового распределения излучения, рассеянного системами из трех близко расположенных цилиндров, приводит к значительной трансформации ФУРИР. Существенно усиливается интенсивность в области малых углов рассеяния. Причиной такой трансформации является электродинамическое взаимодействие между частицами, которое усиливается при уменьшении расстояния между исследуемыми объектами.

### Литература

1. Ковтун-Кужель В. А., Понявина А. Н. Когерентное рассеяние света монослоями частиц цилиндрической формы. VI Конгресс физиков Беларуси: сб. науч. Трудов. Нац. академия наук Беларуси; редкол.: С.Я. Килин (гл. ред.) [и др.]. – Минск: Институт физики НАН Беларуси, 2017. С. 158–159.
2. Ковтун-Кужель В. А. Рассеяние электромагнитных волн в пространственно-упорядоченных структурах диэлектрических цилиндров конечной длины : дис. ... канд. физ.-мат. наук : 01.04.05 / В. А. Ковтун-Кужель. – Минск, 2019. 128 с.

## The electromagnetic radiation scattering a system of three of finite dielectric cylinder

I.A. Mazaila, V.A. Kovtun-Kuzhel, A.P. Samarodau, D.V. Khatsuk

*Yanka Kupala State University of Grodno, Belarus; e-mail: kovtun@grsu.by*

A numerical simulation of the functions of the angular distribution of the scattering phase function of a system of three of finite dielectric cylinders is made using the formalism of the volume integral equation. The angular characteristics dependence on the optical and geometric parameters is studied. It is shown that the electrodynamic interaction between the cylinders leads to a strong change of the angular distribution of intensity of the radiation scattered by this system in comparison with that for three cylinders without electrodynamic coupling.

**Keywords:** finite cylinder, electrodynamic coupling, the diffraction parameter.