

УДК 535.37:621.373

ЛОКАЛИЗАЦИЯ И РАССЕЙЯНИЕ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ В УПОРЯДОЧЕННЫХ АНСАМБЛЯХ КОНЕЧНЫХ ЦИЛИНДРОВ

В.А. Ковтун-Кужель¹, Р.А. Дынич², А.Н. Понявина²

¹Гродненский государственный университет им. Я. Купалы, Гродно

²Институт физики им. Б.И. Степанова НАН Беларуси, Минск

LOCALIZATION AND SCATTERING OF ELECTROMAGNETIC WAVES IN ORDERED ARRAYS OF FINITE CYLINDERS

V.A. Kovtun-Kuszhel¹, R.A. Dynich², A.N. Ponyavina²

¹Y. Kupala Grodno State University, Grodno

²B.I. Stepanov Institute of Physics National Academy of Sciences of Belarus, Minsk

Исследованы особенности локализации и рассеяния электромагнитного излучения упорядоченными ансамблями, состоящими из параллельных друг другу круговых цилиндров конечной длины (т. н. «мультимеры»). С применением формализма объемного интегрального уравнения изучены прямые и инверсные системы с сотовой структурой. Проанализирована зависимость диаграмм направленности, а также картин распределения внутреннего и ближнего поля от размеров цилиндров и образованных ими мультимеров при условии падения излучения вдоль оси цилиндров.

Ключевые слова: упорядоченные ансамбли цилиндров, диаграммы направленности, распределение ближнего поля.

We considered a high-ordered array of a finite number of circular cylinders characterized by a defined length and oriented perpendicularly to a planar substrate (so called "multimers"). On the base of the volume integral equation formalism we studied both straight and inverse dielectric systems with a honeycomb structure. The scattering direction diagrams and a field distribution into/near the cylinders included into a multimer were analyzed at different cylinder and multimer sizes and for a number of materials under condition of incident light directed along a pore axis.

Keywords: space-ordered cylinders, direction diagrams, near-field distribution.

Введение

В настоящее время проблема распространения, рассеяния и локализации электромагнитного излучения в неоднородных пространственно упорядоченных структурах является одной из наиболее актуальных задач фотоники и радиофизики. Частотная и пространственная фильтрация излучения такими структурами рассматривается как высокоэффективный способ управления прохождением волн, который может быть использован для значительного расширения возможностей обработки сигналов.

Важнейшей причиной, вызывающей существенную трансформацию спектральных и угловых характеристик электромагнитного излучения при его взаимодействии с системой рассеивателей, является многократное рассеяние. В случае пространственно упорядоченных структур многократное рассеяние в значительной степени определяется эффектами когерентной природы, которые предполагают интерференционное суммирование полей, рассеянных отдельными рассеивателями. Интерференция многократно рассеянных волн в условиях строгой периодичности структуры, как это имеет место в фотонных кристаллах (ФК), может приводить к формированию спектральных и пространственно-частотных зон, в которых распространение электромагнитного

излучения полностью запрещено или существенно подавлено [1]. Другим немаловажным обстоятельством, роль которого усиливается в системах близкорасположенных рассеивателей, является неоднородность поля вблизи их поверхности. При разработке способов управления спектральными и рассеивающими свойствами объектов за счет целенаправленного выбора их структурных параметров выявление особенностей формирования внутренних и ближних полей является полезным и даже необходимым этапом исследования.

Для ряда практических применений наиболее перспективными являются 2D пространственно-упорядоченные структуры, для которых характерна периодичность строения в двух измерениях. К их числу относятся и т.н. сотовые пористые (канальные) и гексагональные столбчатые структуры, представляющие собой упорядоченные системы одинаково ориентированных цилиндров конечной длины. Например, известно, что нанопористые тонкие пленки с сотовой структурой, сформированные электрохимическим анодированием алюминия, обладают свойствами спектральной и угловой селективности [1], [2]. Установлено также, что допирование таких пористых сотовых структур ионами редкоземельных элементов сопровождается существенным

усилением люминесценции и изменением ее углового распределения [3]. Кроме того, использование электродинамически связанных цилиндров конечной длины представляется весьма эффективным способом управления диаграммами направленности излучателей для терагерцового и микроволнового диапазонов [4]. Выявление особенностей формирования внутренних полей в системах такого рода способствует разработке способов управления спектральными и рассеивающими свойствами за счет целенаправленного выбора их структурных параметров.

1 Метод расчета

При практическом использовании оптических элементов на основе канальных или столбчатых структур часто реализуется ситуация, когда излучение падает перпендикулярно поверхности образца, то есть вдоль оси цилиндрической неоднородности [1]–[3].

В настоящей работе мы рассмотрели ансамбль из конечного числа одинаковых круговых цилиндров (т. н. мультимер), оси которых ориентированы вдоль направления распространения падающего света, то есть вдоль оси OZ . Шесть цилиндров располагаются симметрично по окружности диаметром $D=2R$, центр которой определяется положением центрального цилиндра (рисунок 1.1).

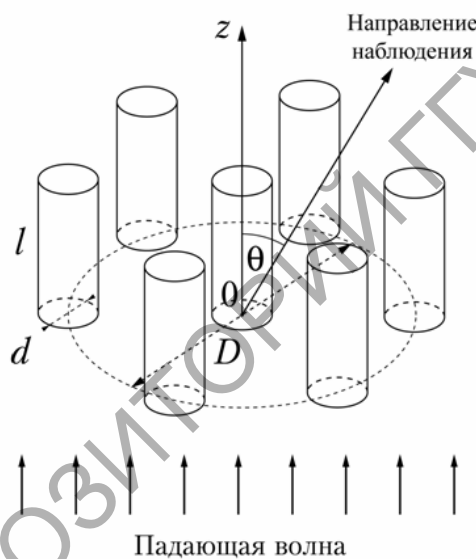


Рисунок 1.1 – Гексагональный мультимер из одинаковых цилиндров

Такой тип мультимера воспроизводит топологию элементарных ячеек для систем с сотовой структурой и гексагональной симметрией.

Следует отметить, что в случае конечного числа упорядоченных рассеивателей неприменимы хорошо развитые к настоящему времени методы численного исследования спектральных и угловых характеристик фотонных кристаллов с бесконечными размерами [5]. С нашей точки

зрения, наиболее эффективное рассмотрение характеристик мультимеров может быть проведено в рамках теории многократного рассеяния волн (ТМРВ) на конечном числе рассеивателей [6]. ТМРВ базируется на использовании рассеивающих характеристик изолированных цилиндрических частиц, находящихся в поле падающей волны. В то же время задача рассеяния на цилиндре конечной длины, который является составной частью рассматриваемого нами мультимера, не имеет точного аналитического решения. Для описания характеристик рассеяния и поглощения конечными цилиндрами наиболее часто в настоящее время применяются численные методы, основанные на методе Т-матрицы или на применении к решению дифференциальных или интегральных уравнений Максвелла конечно-разностных схем в частотной или временной области (см. ссылки в [6]). Применительно к телам вращения развиты также численные методы решения интегральных уравнений относительно истинных или эквивалентных токов на поверхностях раздела [4].

В настоящей работе мы использовали модель взаимодействия электромагнитной волны с мультимером, базирующуюся на формализме объемного интегрального уравнения [7], [8]. Основной метода VIEF служит интегральное уравнение Максвелла, согласно которому напряженность электрического поля в любой точке пространства определяется как:

$$\mathbf{E}(\mathbf{r}_1) = \mathbf{E}_0(\mathbf{r}_1) + \frac{k^2}{4\pi} \iiint [m^2(\mathbf{r}_2) - 1] \mathbf{E}(\mathbf{r}_2) G(\mathbf{r}_1, \mathbf{r}_2) d^3(\mathbf{r}_2), \quad (1.1)$$

где \mathbf{E} обозначает полное поле в рассматриваемой точке, \mathbf{E}_0 – поле падающей волны, \mathbf{G} – диадная функция Грина, m – комплексный относительный показатель преломления, \mathbf{k} – волновой вектор падающей волны.

Далее рассматриваемый объект разбивается на N одинаковых по размерам элементарных кубических ячеек, показатель преломления которых сопоставляется соответствующему материалу. При этом интегральное уравнение (1.1) сводится к матричному уравнению, определенному в $3N$ -мерном пространстве комплексных чисел:

$$\mathbf{A}\mathbf{E}_v = \mathbf{E}_v^{\text{in}}. \quad (1.2)$$

Здесь \mathbf{A} – квадратная матрица, описывающая рассеяние элементарных ячеек в условиях электродинамического взаимодействия между ними, \mathbf{E}_v – вектор-столбец, содержащий значения искомого поля в каждой ячейке, \mathbf{E}_v^{in} – вектор-столбец, содержащий значения падающего поля в ячейках. Матричное уравнение (1.2) в дальнейшем решается численными методами, путем минимизации функции $|\mathbf{A}\mathbf{E}_v - \mathbf{E}_v^{\text{in}}|^2$.

Такой подход позволяет рассчитать оптические сечения рассматриваемого объекта (см.,

например, [8]), а также амплитудные функции рассеяния $S_1(\theta)$, $S_2(\theta)$, соответствующие ортогональным поляризациям падающего света, и значения поля в любой точке исследуемого пространства (в том числе внутри частицы и в ближней от нее зоне).

В настоящей работе метод применяется для расчета диаграмм направленности $I(\theta)$ отдельных цилиндров и образованных ими гексагональных мультимеров. Диаграммы направленности (ДН) определялись из следующих соотношений:

$$I(\theta) = \frac{|S(\theta)|^2}{\pi \rho_{d(D)}^2 Q_{sca}},$$

$$|S(\theta)|^2 = \frac{1}{2} (|S_1(\theta)|^2 + |S_2(\theta)|^2),$$

$$|S_i(\theta)|^2 = [\text{Re } S_i(\theta)]^2 + [\text{Im } S_i(\theta)]^2.$$

Здесь фактор эффективности рассеяния Q_{sca} и дифракционный параметр $\rho_{d(D)} = \pi d(D) / \lambda$ соответствуют рассматриваемому объекту, т. е. отдельному цилиндру или мультимеру.

Сопутствующий расчет и анализ характеристик распределения ближнего поля проводился с целью выявления особенностей электродинамических взаимодействий, определяющих формирование ДН мультимера.

2 Обсуждение результатов

Численные исследования диаграмм направленности и картин распределения внутреннего и ближнего полей проводились с целью установления их зависимости от размеров цилиндров и мультимеров, а также от диэлектрических свойств материалов цилиндров и окружающей их матрицы. С использованием формализма объемного интегрального уравнения изучались как прямые, так и инверсные диэлектрические системы цилиндров. Напомним, что под инверсными системами понимаются структуры, для которых показатель преломления матрицы превышает показатель преломления внедренных в нее цилиндров.

На рисунке 2.1 представлены картины распределения внутреннего и ближнего поля для одиночного цилиндра, находящегося в поле плоской электромагнитной волны, которая распространяется вдоль оси OZ , имеет единичную амплитуду $E_0=1$ и поляризована вдоль оси OY . Изменение цвета от черного к белому на рисунке соответствует увеличению амплитуды локального поля. В верхней панели (панель 1) приведены данные для цилиндра из органического стекла, размещенного в воздухе, а в средней (2) и нижней (3) панелях – для воздушной цилиндрической поры в оргстекле.

Как видно из приведенных рисунков, распределение внутреннего и ближнего поля зависит от ориентации электрического вектора падающей волны относительно рассматриваемого

сечения. Общим для прямого и инверсного случаев (при $\lambda=600$ нм) является немонотонное изменение интенсивности поля по длине цилиндра в приграничной области, а также смещение «горячих пятен» в переднюю полусферу, где отношение

$$k = \frac{|E|^2}{|E_0|^2}$$

достигает максимальных значений $k_{\max}=0.8$ для цилиндра из оргстекла и $k_{\max}=1.5$ для воздушной поры с теми же размерами. Интересно отметить, что уменьшение длины волны падающего излучения до $\lambda=300$ нм приводит в инверсном случае к существенной трансформации внутреннего поля. Как видно из приведенных рисунков, в этом случае внутри воздушных цилиндров формируется «холодная» область, а излучение локализуется на границе воздуха и оргстекла на поверхности цилиндра ($k_{\max}=2$).

При объединении цилиндров в мультимер топология внутреннего и ближнего поля изменяется. Область «горячих пятен» смещается внутрь мультимера и по направлению к плоскости входа в него излучения. Чем меньше диаметр окружности, на которой расположены цилиндры, тем более однородным становится внутреннее поле (рисунок 2.2).

На рисунках 2.3 и 2.4 представлены картины распределения внутренних и ближних полей в сечениях ZOY (а), ZOX (б) для мультимеров с радиусами 100 нм и 140 нм соответственно. Мультимеры образованы цилиндрическими воздушными порами в органическом стекле. Параметры цилиндров соответствуют указанным в подписях к рисунку 2.1. Длина волны падающего излучения равна 300 нм (панель 1) и 600 нм (панель 2). Как видно из рисунков, при уменьшении длины волны падающего излучения для инверсных мультимеров сохраняется тенденция локализации внутреннего поля у внешней поверхности, отмеченная выше при анализе внутренних полей в отдельной воздушной поре.

Основной причиной изменений, отмеченных в характере распределения внутреннего поля внутри мультимеров по сравнению с изолированными цилиндрами, являются, по-видимому, коллективные электродинамические взаимодействия и эффекты фотонного ограничения, вызванные пространственным упорядочением цилиндров. Эти изменения находят свое отражение и в трансформации диаграмм направленности рассеянного излучения. В частности, изменения локальных характеристик поля внутри мультимера сопровождаются изменениями эффективного поля, воздействующего на каждый из элементарных рассеивателей, и отражаются на форме ДН мультимеров.

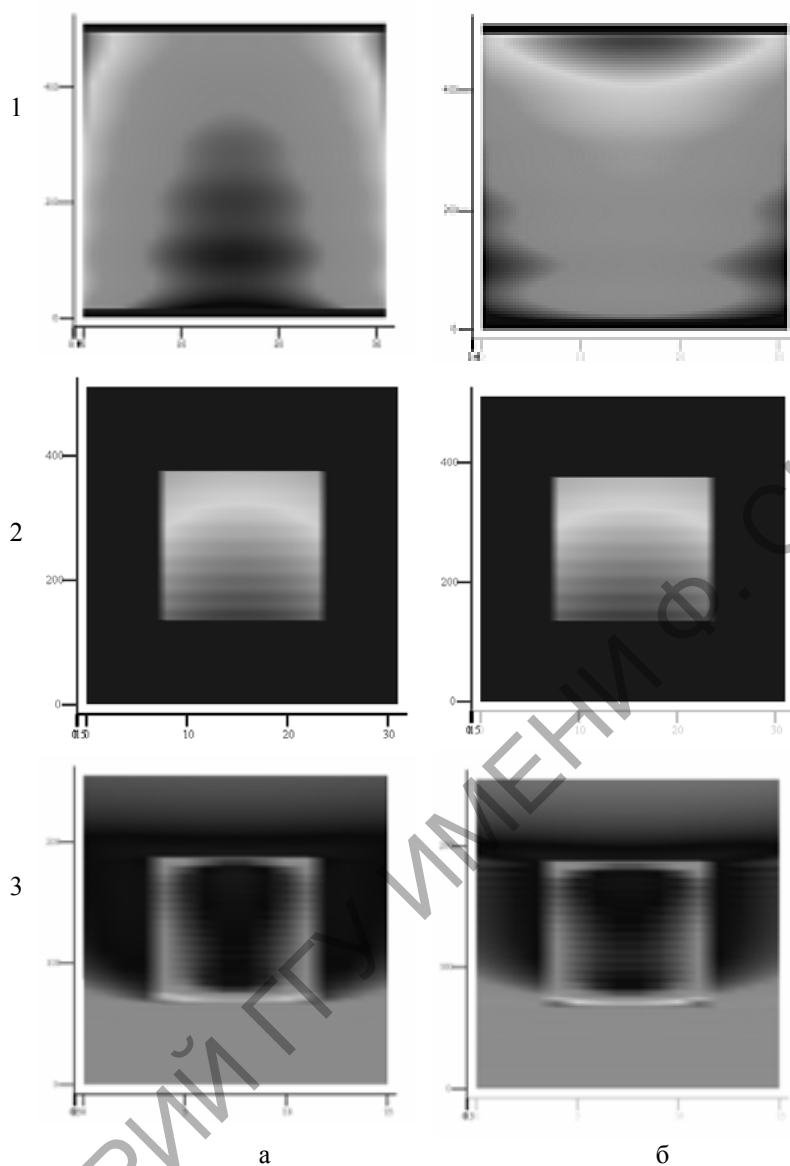


Рисунок 2.1 – Картины распределения поля в центральных сечениях отдельного цилиндра из оргстекла в воздухе (панель 1) и воздушной цилиндрической поры в оргстекле (панели 2 и 3): сечение ZOY (а), ZOX (б). Длина волны излучения 600 нм (панель 1 и 2) и 300 нм (панель 3), длина цилиндра 1500 нм, диаметр 100 нм

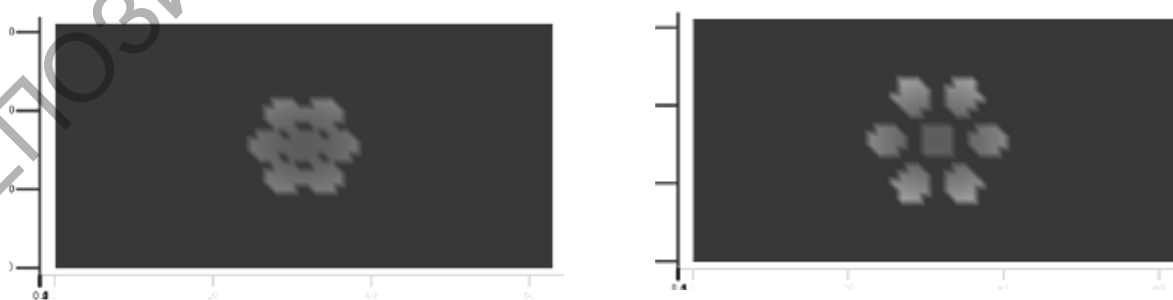


Рисунок 2.2 – Картины распределения ближнего поля в центральном сечении XOY для мультимеров с $R=100$ нм (а) и $R=140$ нм (б). Длина волны падающего излучения 600 нм, длина каждого цилиндра из органического стекла $l=1500$ нм, диаметр $d=100$ нм

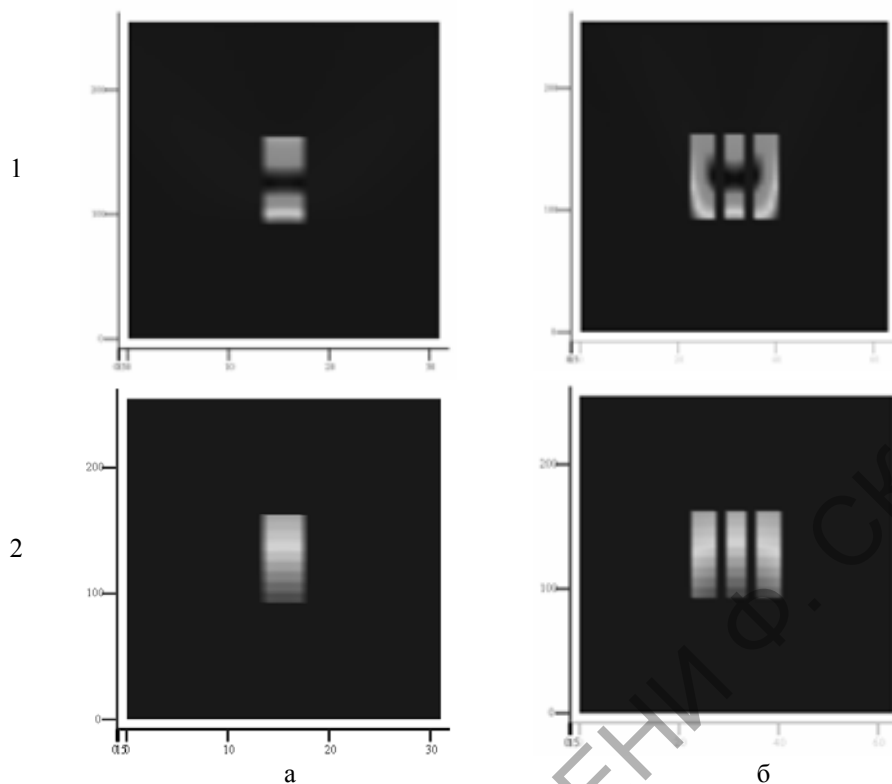


Рисунок 2.3 – Инверсный гексагональный мультимер с радиусом 100 нм, образованный цилиндрическими порами в органическом стекле. Длина цилиндрических пор 1500 нм, диаметр 100 нм. Верхняя панель – длина волны 300 нм, нижняя – 600 нм

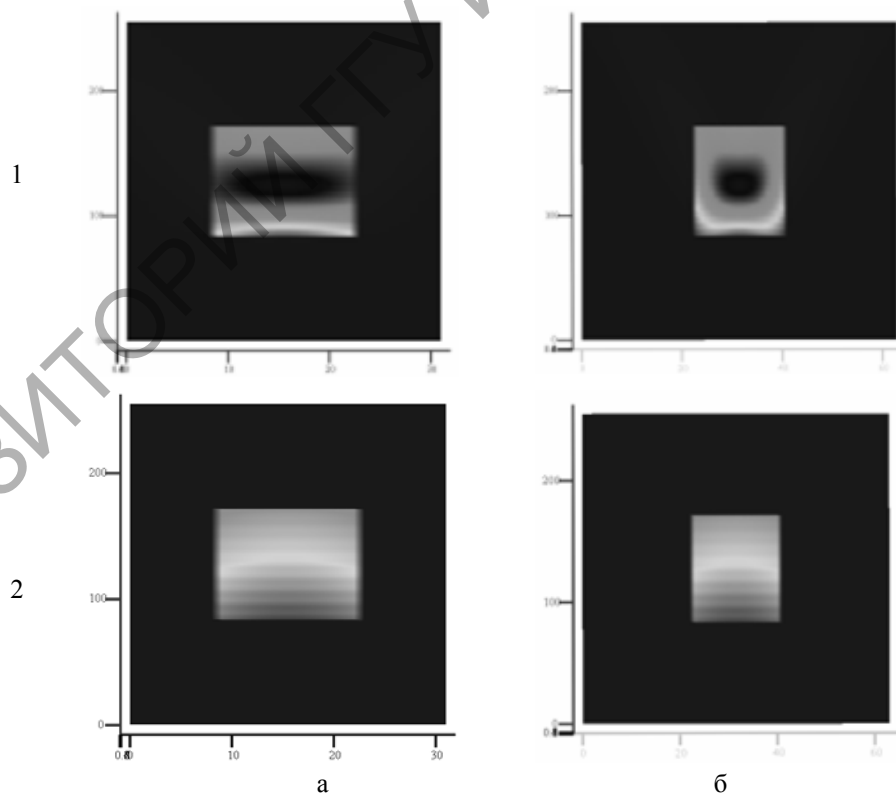


Рисунок 2.4 – Инверсный гексагональный мультимер с радиусом 140 нм, образованный цилиндрическими порами в органическом стекле. Длина цилиндрических пор 1500 нм, диаметр 100 нм. Верхняя панель – длина волны 300 нм, нижняя – 600 нм

В зависимости от геометрических и диэлектрических свойств элементарных излучателей может наблюдаться как увеличение, так и уменьшение степени анизотропии ДН мультимера по сравнению с ДН отдельного цилиндра. Интерференционное усиление или гашение излучения в отдельных направлениях может приводить к изменению интенсивности определенных угловых лепестков ДН, определяемых параметрами отдельных цилиндров, их угловому смещению и даже появлению дополнительных лепестков в ДН мультимера.

Например, в случае, рассмотренном на рисунке 2.5, объединение цилиндров в мультимер приводит к значительному усилению интенсивности рассеяния как в направлении вперед (примерно на порядок), так и в направлении, обратном направлению распространения падающего излучения (примерно на два порядка). Наблюдается также угловое смещение боковых лепестков в диаграмме направленности, особенно существенное в области углов рассеяния $80\text{--}130^\circ$. Это можно объяснить тем, что значительные электродинамические взаимодействия между цилиндрами при их плотной упаковке приводят к тому, что мультимер можно рассматривать как единый эффективный рассеиватель с более низким фактором асимметрии, чем образующие его отдельные цилиндры, что и приводит к увеличению степени диффузности ДН мультимера.

Вместе с тем, уменьшение расстояний между цилиндрами из оргстекла в мультимере ($R = 140$ нм и $R = 100$ нм) проявляется, главным образом, лишь в незначительном уменьшении степени вытянутости ДН и изменении интенсивности рассеяния в боковых лепестках для углов рассеяния $100\text{--}130^\circ$. В области передней полусферы изменение поперечных размеров рассматриваемого мультимера практически не влияет на характеристики его диаграммы направленности.

При переходе от прямых к инверсным системам, как показывает сравнение данных на рисунках 2.5 и 2.6, вытянутость диаграммы направленности отдельного цилиндра увеличивается. Рассеяние в области малых углов возрастает, первый минимум рассеяния на ДН смещается в область меньших углов (от 60° к 30°). Можно предположить, что это приводит к ослаблению переоблучения цилиндрами внутри мультимера. Это предположение подтверждается и наличием характерных холодных областей в картинах распределения внутреннего поля для инверсных мультимеров. В результате более заметным становится угловое смещение боковых лепестков при объединении цилиндров в мультимер, которое определяется интерференционным усилением или гашением излучения, рассеянного отдельными цилиндрами. В целом трансформация ДН инверсного мультимера определяется как понижением его фактора асимметрии по сравнению с цилиндром, так и возрастанием значения дифракционного параметра, определяемого характерными поперечными размерами объекта. С уменьшением длины волны падающего излучения эти особенности ДН для инверсного случая проявляются все более отчетливо (рисунок 2.7).

Следует отметить, что в силу зависимости характеристик рассеяния от относительных размерных параметров соответствующее масштабирование позволяет распространить полученные результаты и на микроволновую область. Например, приведенные на рисунках 2.2, 2.5 данные одинаково справедливы как для длины волны оптического диапазона 600 нм при размерах цилиндра $l=1500$ нм, $d=100$ нм и радиусах окружности мультимеров 100 нм и 140 нм, так и для длины волны 6 см при размерах цилиндра $l=15$ см, $d=1$ см и радиусах окружности мультимеров 1 см и 1.4 см.

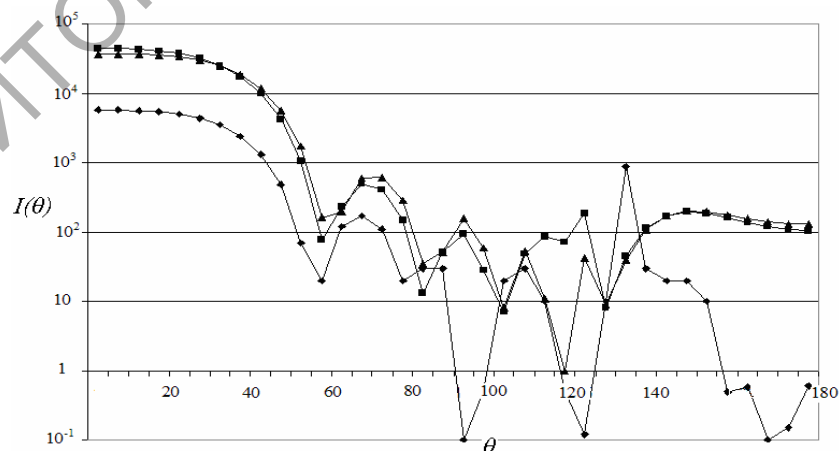


Рисунок 2.5 – Диаграммы направленности для отдельного цилиндра и мультимеров с радиусами 100 нм и 140 нм. Длина волны падающего излучения 600 нм, длина каждого цилиндра из органического стекла 1500 нм, диаметр – 100 нм ((1) — Цилиндр из органического стекла; (2) — Мультимер из органического стекла, $R=140$ нм; (3) — Мультимер из органического стекла, $R=100$ нм)

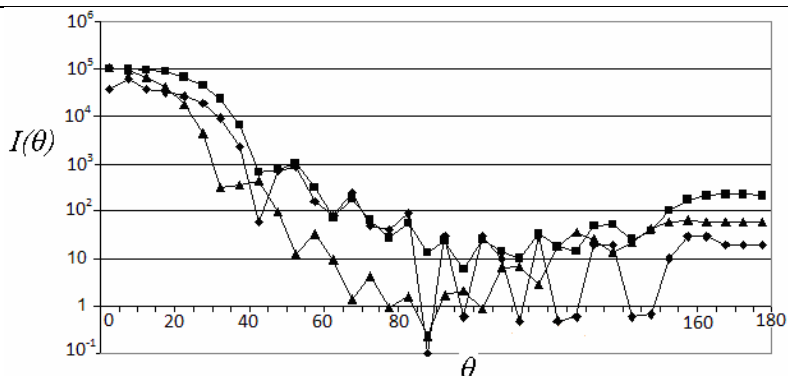


Рисунок 2.6 – Диаграммы направленности для отдельной цилиндрической воздушной поры в оргстекле и инверсных мультимеров с радиусами 100 нм и 140 нм. Длина волны падающего излучения 600 нм, длина каждого цилиндра 1500 нм, диаметр – 100 нм ((1) — Цилиндрическая воздушная пора в оргстекле, $d=100$ нм, $l=1500$ нм; (2) — Инверсный мультимер, $R=140$ нм; (3) — Инверсный мультимер, $R=100$ нм)

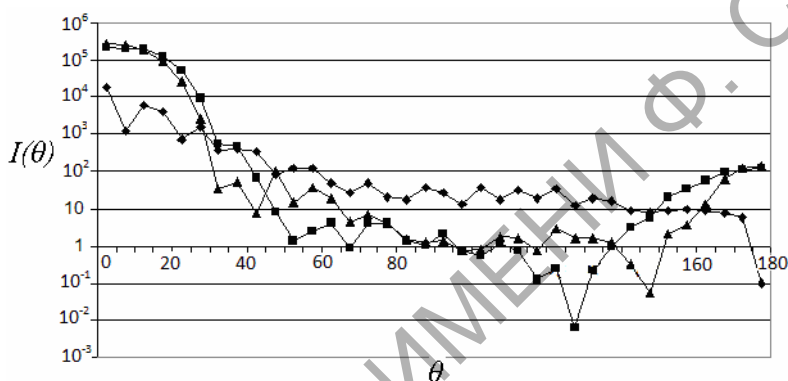


Рисунок 2.7 – Диаграммы направленности для отдельной цилиндрической воздушной поры в оргстекле и инверсных мультимеров с радиусами 100 нм и 140 нм. Длина волны падающего излучения 300 нм, длина каждого цилиндра 1500 нм, диаметр – 100 нм ((1) — Цилиндрическая воздушная пора в оргстекле; (2) — Инверсный мультимер, $R=140$ нм; (3) — Инверсный мультимер, $R=100$ нм)

Заключение

Проведенные исследования показывают, что как картины распределения внутреннего поля, так и угловое распределение излучения, рассеянного системой пространственно упорядоченных цилиндров, могут существенно отличаться от соответствующих характеристик изолированных цилиндров. Трансформация формы диаграммы направленности мультимера определяется совокупным действием эффектов электродинамического взаимодействия и пространственного ограничения, степень проявления которых зависит как от микрофизических характеристик отдельных цилиндров, так и от геометрических характеристик мультимера.

ЛИТЕРАТУРА

1. Гапоненко, С.В. Оптика наноструктур / С.В. Гапоненко. – С.-Пб. : Недра, 2005. – 326 с.
2. Selective Scattering of Light by Column Nanosize Dielectric Structures / A.N. Ponyavina [et al.] // Physics, Chemistry and Application of Nanosstructures. – Singapore, World Scientific. – 1999. – P. 100–102.

3. Enhanced Luminescence of Europium in Porous Anodic Alumina Films / N.V. Gaponenko [et al.] // Solid State Phen. – 2004. – № 97–98. – P. 251–258.

4. Васильев, Е.Н. Возбуждение тел вращения / Е.Н.Васильев. – М. : Радио и связь, 1987. – 270 с.

5. Sokolis, C.M. Photonic Crystals and Light Localization in the 21st Century 2001 Springer / M. Sokolis. – 2001. – 605 p.

6. Mishchenko, M.I. Scattering, Absorption and Emission of Light by Small Particles / M.I. Mishchenko, L.D. Travis, A.A. Lacis // Cambridge, University press, 2002. – 445 p.

7. Hage, J. I. Scattering from arbitrarily shaped particles: theory and experiment / J.I. Hage, J.M. Greenberg, R.T. Wang // Applied Optics, 1991. – Vol. 30. – P. 1141–1152.

8. Vereshchagin, V.G. Application of the Method of Integral Equations to the Calculation of the Coherent Transmittance of a Monolayer of Cylindrical Particles / V.G. Vereshchagin, R.A. Dynich, A.N. Ponyavina // Opt. Spectrosc, 1999. – Vol. 87. – P. 116–121.

Поступила в редакцию 30.04.12.