

# Исследование ближнего поля, рассеянного нанообъектами вблизи плоской границы раздела

## Аннотация

Работа относится к области вычислительной нанофотоники (электродинамики наноструктур). Отчет содержит результаты прямого моделирования рассеяния света наноразмерными телами методом дискретных диполей.

## 1 Состав коллектива и грантовая поддержка работы

- к.ф.-м.н. Белай Олег Владимирович, старший научный сотрудник лаборатории фотоники ИАиЭ СО РАН
- к.ф.-м.н. Перминов Сергей Вадимович, старший научный сотрудник лаборатории №31 ИФП СО РАН
- д.ф.-м.н., доцент Фрумин Леонид Лазаревич, ведущий научный сотрудник лаборатории фотоники ИАиЭ СО РАН
- д.ф.-м.н., профессор Шапиро Давид Абрамович, заведующий лабораторией фотоники ИАиЭ СО РАН

Работа выполнена в рамках проектов:

- грант Совета по грантам при Президенте РФ для поддержки ведущих научных школ РФ. Проект "Нелинейная спектроскопия и фотоника наноструктур, микроструктурированных волоконных световодов и атомов гранты НШ-2979.2012.2 (2012–2013 годы), НШ-4447.2014.2 (2014–2015 годы), руководитель академик Шалагин А.М.;
- программа №24 Президиума РАН. Проект 24.10 "Рассеяние неоднородной волны на периодическом массиве наночастиц" (2012–2014 годы), руководитель профессор Шапиро Д.А.

## 2 Научное содержание работы

### 2.1 Постановка задачи

Как известно, дифракция ограничивает предел разрешения оптической микроскопии длиной волны излучения. Это ограничение справедливо для однородных (бегущих) волн. Неоднородные волны содержат информацию о мельчайших деталях объекта, однако не могут быть зарегистрированы на значительном удалении от него вследствие экспоненциального затухания. Выход состоит в том, чтобы передать информацию о тонкой пространственной структуре из ближнего поля в волновую зону, например, посредством заостренного волоконного волновода. В этом заключается принцип ближнепольной оптической сканирующей микроскопии. Таким образом, изучение рассеяния неоднородных (затухающих) волн представляет собой центральную проблему субволновой оптической диагностики. С темой субволнового разрешения тесно связана также задача концентрация энергии светового поля в наномасштабной области (в ближней зоне). При этом на первый план выходят оптические процессы (поглощение, рассеяние, дифракция) с участием неоднородных волн.

Задача рассеяния неоднородных волн является значительно более сложной, чем в случае однородных бегущих волн. В ситуации, когда неоднородная волна возникает вблизи границы раздела двух сред (например, при полном внутреннем отражении), то и рассеиватель должен находиться вблизи этой границы, что приводит к возникновению многократных отражений и существенно усложняет задачу.

В данной работе для расчета рассеянного поля применялся метод дискретных диполей (МДД). Применительно к однородному пространству, метод подробно описан в относительно современном обзоре *M. Yurkin and A. Hoekstra, J. Quant. Spectrosc. Radiat. Transfer 106, 558 (2007)*. В нашей работе [1] была предложена функция Грина специального вида, учитывающая наличие плоской границы раздела между двумя полупространствами. Соответственно, МДД был нами модифицирован посредством использования в нём этой специальной функции Грина, что позволило осуществить моделирование рассеяния телами, находящимися вблизи границы.

### 2.2 Полученные результаты

Тестирование предложенного подхода было выполнено на задаче рассеяния плоской волны на золотом цилиндре в однородном пространстве с показателем преломления  $n = 1.5$  (что соответствует стеклу). Данная задача имеет аналитическое решение. На рис. 1 изображена круговая диаграмма квадрата электрического поля, рассчитанного аналитически и численно (МДД).

На рис. 2 показана диаграмма поля рассеяния диэлектрического ( $n = 1.5$ ) цилин-

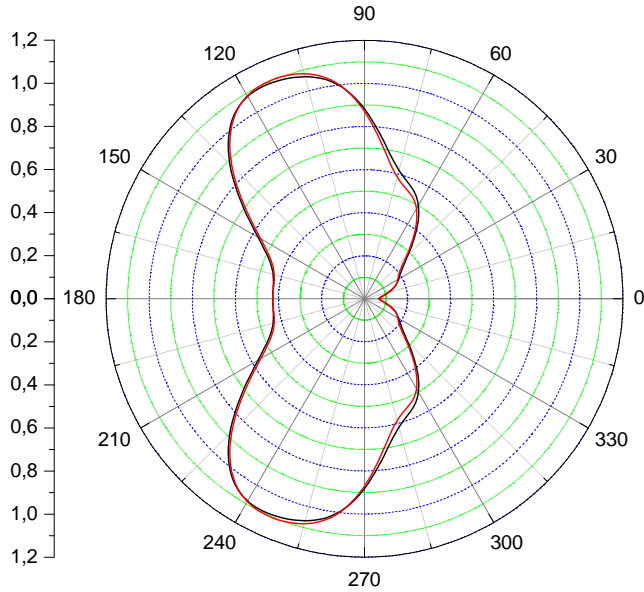


Рис. 1: Интенсивность рассеянного электрического поля,  $|\vec{E}_{scatt}|^2$ , на окружности с центром в начале координат и радиусом 300 нм. Черная кривая — расчет методом дискретных диполей, красная — аналитическое решение. Падающее поле — плоская волна с волновым вектором  $\vec{k} = \{k_x, 0, 0\}$ ,  $k_x = 2\pi n/\lambda$ ,  $\lambda = 500$  нм. Радиус цилиндра 150 нм.

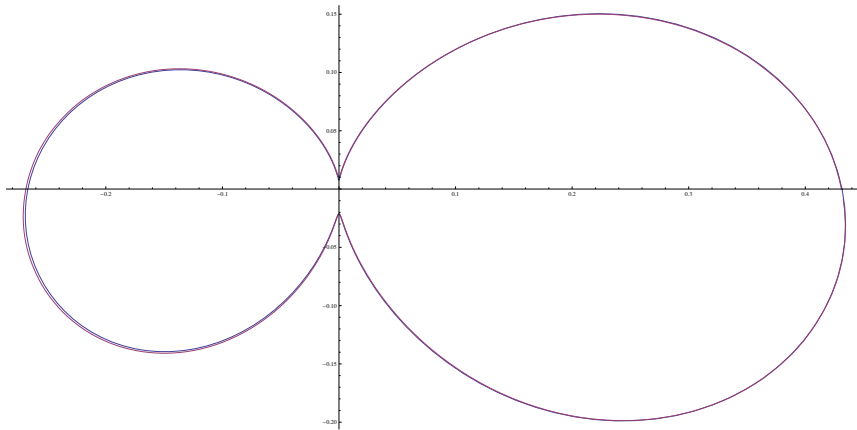


Рис. 2: Интенсивность рассеянного магнитного поля,  $|\vec{H}_{scatt}|^2$ , на окружности с центром в центре цилиндра и радиусом 105 нм. Красная кривая — расчет методом дискретных диполей, синяя — методом граничных элементов. Длина волны возбуждающего света 1000 нм, радиус цилиндра 100 нм.

дра, находящегося в вакууме вблизи (с зазором 10 нм) границы раздела с диэлектриком (также  $n = 1.5$ ), рассчитанного двумя численными методами — МДД и методом граничных элементов [1].

### 2.3 Эффект от использования кластера

Решаемые задачи предъявляют высокие требования как к размеру оперативной памяти, так и скорости вычислений. Характерный размер матрицы СЛУ составлял  $\sim 30000$ , что требует  $\sim 16$  Гбайт для её размещения. Кроме того, для нахождения каждого элемента матрицы требовалось численное вычисление нескольких интегралов, которое было эффективно распараллелено в разных потоках с использованием OpenMP. При выполнении вычислений использовалось также и естественное распараллеливание описанной задачи (на уровне процессов), обеспеченное взаимной независимостью расчетов для разных значений параметров. В целом, использование вычислительного кластера было определяющим для успешного выполнения поставленной задачи.

## Перечень публикаций

- [1] O. V. Belai, L. L. Frumin, S. V. Perminov, and D. A. Shapiro, "Scattering of evanescent wave by two cylinders near a flat boundary," EPL **97**, 10,007(6) (2012).
- [2] L. L. Frumin, S. V. Perminov, and D. A. Shapiro, "Plasmons excited by an evanescent wave," J. Opt. Soc. Am. B **30**, 2048–2052 (2013).
- [3] L. L. Frumin, A. V. Nemykin, D. A. Shapiro, and S. V. Perminov, "Rayleigh-wood's resonances in the near-field scattering by periodic array of nanowires," 16th Int. Conf. "Laser Optics-2014". Technical digest, TuR6-16, 2014.

## 3 Впечатления от работы вычислительной системы

Работа системы вполне устраивает. Размещённая на сайте документация (в частности, описание Altair PBS Pro) достаточна для освоения "с нуля" в необходимом объёме.