

**АННОТИРОВАННЫЙ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ОТЧЕТ
О РЕЗУЛЬТАТАХ НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИХ РАБОТ, ВЫПОЛНЕННЫХ
НА ЭТАПЕ № 1**

**«Выбор направления исследований. Теоретические оценки и
предварительные расчеты»**

Соглашение от 10 сентября 2012 г. № 14.В37.21.0892

Тема: «Разработка физических принципов высокоэффективного манипулирования микрочастицами с помощью полей оптических поверхностных волн»

Исполнитель: федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского» (Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского)

Ключевые слова: сферические микрочастицы, поверхностные оптические волны, резонансное возбуждение мод, плазменный резонанс, радиационная сила

1. Цель проекта

1.1. Целью проекта является разработка высокоэффективных резонансных методов манипулирования диэлектрическими и металлическими микрочастицами с помощью полей оптических поверхностных волн для целей высокоселективной и поточной сортировки большого количества микрочастиц.

1.2. В проекте будут исследованы возможности использования локализованных оптических волн, направляемых волноведущими структурами различного типа (металлической поверхностью, диэлектрическим слоем, оптическим волокном), для целей сортировки микрочастиц. Разрабатываемый метод оптической сортировки основан на эффекте резонансного возбуждения собственных электромагнитных мод микрочастиц и возникновения вследствие этого гигантской радиационной силы на микрочастицу. В проекте будут исследованы случаи как диэлектрических микрочастиц, обладающих МШГ резонансами, так и металлических микрочастиц, обладающих резонансами плазмонного типа.

2. Основные результаты проекта

2.1. Подготовлен аналитический обзор информационных источников по теме проекта. Проведены патентные исследования.

Выбран оптимальный вариант направления исследований, сопоставлены ожидаемые показатели новой продукции после внедрения результатов НИР с существующими показателями изделий-аналогов.

Разработана методика расчета дифракции поверхностных волн различных типов (поверхностных плазмонов на металлических поверхностях, волноводных мод диэлектрических слоев) на микрочастицах цилиндрической формы. Методика основана на представлении дифрагированного поля вне частицы как поля, создаваемого эффективными источниками тока на поверхности микрочастицы. Внутри микрочастицы поле представляется в виде суперпозиции цилиндрических мод. Пространственное распределение эквивалентных источников по поверхности микрочастицы и коэффициенты разложения по цилиндрическим гармоникам находятся из сшивки полей на границе микрочастицы.

Проведены расчеты дифрагированного на микрочастице электромагнитного поля. Получены выражения для силы, действующей на микрочастицу со стороны поля, на

основе двух различных подходов – с помощью тензора Максвелла и формулы для силы Лоренца. Разработана методика оптимизации расчетов силы на микрочастицу, которая сводит процедуру интегрирования плотности силы по объему микрочастицы к суммированию вкладов в силу от отдельных цилиндрических гармоник. Проведен анализ соотношения вкладов магнитной и электрической составляющих силы Лоренца в результирующую силу. Дано количественное объяснение механизма резкого возрастания радиационной силы на микрочастицу на основе резонансов мод шепчущей галереи (МШГ).

Сделан расчет преобразования электромагнитного импульса падающей поверхностной волны в действующую на микрочастицу силу. Продемонстрирована высокая эффективность преобразования – превосходящая предельное значение, соответствующее полному поглощению энергии. Исследована зависимость силы от расстояния между микрочастицей и волноведущей поверхностью. При этом получена немонотонная зависимость, свидетельствующая о важности учета отражения рассеянного микрочастицей поля поверхностью. Показана взаимосвязь положения и ширины пиков резонансного усиления силы с провалами в коэффициенте прохождения поверхностной волны. Продемонстрировано выполнение баланса мощности начальной поверхностной волны и конечного распределения поля (прошедшей и отраженной поверхностных волн и поля в дальней зоне).

Проанализировано направление движения микрочастицы под действием силы со стороны электромагнитного поля. Показано, что микрочастица может подталкиваться полем как к волноведущей поверхности, так и от поверхности. Вдоль поверхности частица увлекается полем в направлении распространения поверхностной волны.

2.2. Впервые проведен строгий расчет силы, действующей на микрочастицу со стороны поверхностной электромагнитной волны, при учете влияния волноведущей поверхности. До этого в литературе проводились лишь приближенные расчеты в пренебрежении влиянием волноведущей поверхности и расчеты для микрочастиц в поле эванесцентной моды в условиях полного внутреннего отражения плоской волны от границы раздела двух сред. Рассмотрение в проекте случая поверхностных волн впервые позволило проанализировать выполнение законов сохранения импульса и энергии при взаимодействии направляемой волны с частицей.

Впервые продемонстрирована высокая – превосходящая предельное значение, соответствующее полному поглощению энергии – эффективность преобразования электромагнитного импульса поверхностной волны в действующую на микрочастицу силу.

2.3. Предварительные результаты приняты к публикации в журнале “Light: Science and Applications” издательства Nature: Y. Li, O.V. Svitelskiy, A.V. Maslov, D. Carnegie, E. Rafailov, and V.N. Astratov “Giant resonant light forces in microspherical photonics”. В статье экспериментально продемонстрирована возможность получения рекордных на сегодня в мире (до 0,45 мм/сек) скоростей полимерных микрочастиц размером 15-20 микрон при воздействии световой мощностью 43 мВт. На основе развитых в данном проекте теоретических методов дано обоснование таких гигантских – на порядок выше, чем в предшествующих экспериментальных работах – скоростей как результата эффективного возбуждения МШГ.

3. Назначение и область применения результатов проекта

3.1. Результаты проекта предназначены для создания технологии высокоточного потокового селектирования диэлектрических микрочастиц сферической формы. Острая

потребность в создании такой технологии существует в связи с широким применением диэлектрических микрочастиц в качестве высокодобротных резонаторов для широкого спектра практических приложений: в стандартах частоты, для обработки сигналов в коммуникационных оптоволоконных системах, для высокочастотной селекции сигналов в сверхчувствительных детекторах гражданских и военных радаров, для спектроскопии и анализа химических и биологических агентов с помощью оптических сенсоров, в сверхчувствительных детекторах механического сдвига, поворота и ускорения, а также в гироскопах. Полимерные микросфера из разлагающихся материалов находят применение для доставки лекарств (например, протеинов) в медицинских целях. Монолитные диэлектрические микrorезонаторы способны поддерживать моды шепчущей галереи (МШГ), обладающие исключительно высокой добротностью ($Q>10e5$), и имеют большую механическую стабильность по сравнению с резонаторами Фабри-Перо на основе зеркал. Особый научно-прикладной интерес имеют структуры, состоящие из взаимодействующих между собой МШГ резонаторов – выстроенных в линию (одномерных структур) и расположенных в произвольной геометрии (фотонных молекул). Такие структуры позволяют создавать фильтры со сложными спектральными характеристиками и линии задержки с конструируемыми дисперсионными свойствами, а также лазеры с заданной диаграммой направленности. Перспективно использование взаимодействующих высокодобротных резонаторов для квантовых расчетов.

Перспективы широкого практического применения высокодобротных МШГ резонаторов требуют развития технологий их высокоточного изготовления. Это особенно важно для создания приборов и систем из взаимодействующих резонаторов, где необходима их частотная перекрываемость. Данное требование приводит к жесткому ограничению на разброс размеров микрочастиц – не более 0.05%. Такую точность трудно обеспечить на практике при массовом производстве и поэтому технологии селективного отбора играют ключевую роль. В настоящий момент отбор микрочастиц может осуществляться только путем анализа спектральных характеристик отдельных частиц и последующего селектирования с помощью оптических пинцетов или механического микроманипулирования. Такой подход не применим для массового производства.

Полученные в рамках проекта результаты позволят решить проблему поточного высокоточного селектирования микрочастиц с идентичными резонансными характеристиками. Будут разработаны теоретические модели, расчетные программы и методики селектирования, основанные на использовании сильно выраженных резонансных свойств электромагнитных сил, действующих на находящиеся в жидкости микрочастицы со стороны приповерхностных полей, направляемых волноведущими структурами.

4. Перспективы развития исследований

1) В ходе выполнения проекта сформировано исследовательское партнерство с группой мезофотоники профессора Астратова В.Н., факультет физики и оптических наук, университет штата Северная Каролина, Шарлотт, США, проводящей передовые экспериментальные исследования по тематике проекта.

2) Научный коллектив к настоящему времени принимал участие в следующих проектах по тематике, связанной с исследованиями в области нелинейной оптики и лазерной физики:

Грант РФФИ, 08-02-92216-ГФЕН_а «Генерация терагерцового излучения ультракороткими лазерными импульсами и электронными пучками в плазмонных системах»

Грант РФФИ, 10-02-00476-а «Генерация терагерцовых волн движущимися светоиндуцированными источниками для целей поверхностной спектроскопии,

ближнепольной микроскопии и исследования метаматериалов в терагерцовом диапазоне частот»

Грант РФФИ, 11-02-92107-ЯФ_а «Генерация и трансформация терагерцового излучения в планарных метаматериалах и плазмонных кристаллах»

ФЦП «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009-2013 годы ГК № 02.740.11.0563 от 22 марта 2010 г. «Генерация электромагнитных излучений в неосвоенных частотных диапазонах на основе нелинейно-оптических преобразований»

ФЦП «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009-2013 годы ГК П385 от 11 мая 2010 г. «Разработка высокоэффективных методов генерации терагерцового излучения ультракороткими лазерными импульсами»

Грант Правительства Российской Федерации для государственной поддержки научных исследований, проводимых под руководством ведущих ученых в российских образовательных учреждениях высшего профессионального образования «Экстремальные световые поля и их приложения».

ФЦП «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009-2013 годы Соглашение от 24 августа 2012 г. №14.В37.21.0770. «Разработка высокоэффективных нелинейно-оптических методов генерации короткоимпульсного излучения в терагерцовом и среднем инфракрасном диапазонах частот»

3) Наиболее активные работы по тематике проекта ведутся в США. Передовые экспериментальные исследования ведутся там на факультете физики и оптических наук университета штата Северная Каролина, г. Шарлотт.

5. Опыт закрепления молодых исследователей – участников проекта (этапа проекта) в области науки, образования и высоких технологий

Закреплены следующие специалисты:

Михайлычев Николай Евгеньевич, 9.02.1990 года рождения, зачислен в очную аспирантуру Исполнителя;

Бакунов Глеб Михайлович 17.05.1986 года рождения принят на работу на должность мns Исполнителя

6. Вклад приглашенного руководителя в этап проекта

Приглашенным руководителем внесен определяющий вклад в получение научных результатов по проекту. Им предложена сама тематика проекта, новая для коллектива исполнителей. Очное общение с приглашенным исследователем позволило коллективу проекта за короткий срок познакомиться с современным состоянием исследований по данной тематике и выйти на уровень стоящих там наиболее актуальных проблем. Приглашенным руководителем привнесена новая для коллектива культура решения сложных электродинамических задач на основе численных расчетов методом эффективных токов. Через приглашенного руководителя установлены контакты с исследовательской группой из университета Северной Каролины, Шарлотт, США, проводящей экспериментальные работы по тематике проекта.

Приглашенным руководителем был проведен семинар на тему «Создание резонансных электромагнитных сил на микрочастицы» для членов научного коллектива и других сотрудников радиофизического факультета Нижегородского государственного университета им. Н.И. Лобачевского. В результате семинара у участников коллектива проекта была сформирована целостная картина представлений о существующих к настоящему времени знаниях по тематике проекта, ведущихся в этой области экспериментальных и теоретических работах, об актуальных проблемах и направлениях

исследований, а также о перспективах практических приложений полученных результатов.

Программа семинара «Создание резонансных электромагнитных сил на микрочастицы»:

1) Мотивация. Воздействие на микрочастицы электромагнитными полями приводит к возникновению силы. Эти силы - основа захвата и удержания микрочастиц оптическими пинцетами. Направление сил определяется распределением электромагнитного поля в пучке. Величина определяется поляризацией микрочастицы и градиентом поля. Из-за небольшой поляризации диэлектрических микрочастиц в жидкости, силы малы. Помимо увеличения градиента поля является перспективным использование резонансных свойств частиц. Возбуждение мод шепчущей галереи (МШГ) может приводить к появлению резонансных сил (большая величина и сильная частотная зависимость).

2) Цели проекта и краткое изложение решаемых проблем. Разработка высокоэффективных резонансных методов манипулирования микрочастицами с помощью полей оптических поверхностных волн для целей высокоселективной и поточной сортировки большого количества микрочастиц. Оценка эффективности использования волноведущих структур различного типа (металлической поверхности, диэлектрического слоя, оптического волокна).

3) Сила при отражении плоской волны от зеркала. Связь силы, полученной по формуле Лоренца, с изменением импульса волны.

4) Сила на диэлектрическую частицу с малыми размерами. Поляризаемость. Градиентные силы. Силы на металлические частицы. Возникновение плазмонного резонанса. Сила при плазмонном резонансе. Зависимость силы от частоты.

5) Обзор экспериментальных работ. Классическая работа Ашкина по силе на сферические частицы в жидкости. Резонансы мод шепчущей галереи. Слабость сил из-за слабого возбуждения мод. Современных работы по измерению скорости частиц при воздействии приповерхностными полями. Типичные величины скорости, ее увеличение с размером частиц.

6) Обзор последней экспериментальной работы по измерению скорости частиц при возбуждении мод шепчущей галереи. Техника измерения. Получение сильного разброса скоростей для практически одинаковых сфер. Объяснение силы как возбуждение МШГ.

7) Методика расчета поля для частиц в однородной среде. Рассеяние Ми. Расчет силы на основе распределения поля.

8) Проблема учета влияния поверхности. Формулировка задачи дифракции. Методы решения задачи. Недостатки существующих методов, таких как метод конечных разностей во временной области. Преимущества аналитических методов, особенно для частиц сферической и цилиндрической формы. Использование метода эффективных токов для решения задач дифракции. Использование эффективных поверхностных токов. Нахождение функции Грина для слоистой структуры. Разложение полей по модам. Сшивание полей граничными условиями. Расчет силы на основе решения задачи дифракции.

9) Результаты исследования взаимодействия поверхностной волны, направляемой металлической поверхностью, с цилиндром. Сила на цилиндр. Соответствие силы и коэффициента прохождения поверхностной волны.

Приглашенный руководитель на 1-ом этапе выполнения проекта осуществлял очное руководство научными исследованиями в течение 2 месяцев.

Даты въезда/выезда по паспорту:

1) 29 сентября 2012 - 18 октября 2012

2) 20 ноября 2012 - до конца года, отбытие 10 января 2013.

Время пребывания в 2012 году: 62 дня

Проректор по научной работе Нижегородского
государственного университета им. Н.И. Лобачевского

Руководитель Проекта

Гурбатов С.Н.

Маслов А.В.

