

ОТЗЫВ

официального оппонента на диссертацию Ципотана Алексея Сергеевича «Самосборка наноструктур в поле квазирезонансного лазерного излучения», представленную на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.05 – Оптика

Оптические манипуляции атомами, молекулами и наночастицами – интенсивно развивающаяся область современной оптики. При этом методы светового управления наночастицами имеют многообещающие перспективы практического использования в нанотехнологиях для получения сложных устойчивых агрегатов наночастиц по схеме «снизу-вверх». Кроме того разработка новых методов нанооптических манипуляций как правило сопровождается достижением более глубокого понимания самих механизмов взаимодействия света с нанообъектами и поэтому интересна для фундаментальной науки. Одно из быстроразвивающихся направлений исследований в области нанооптических манипуляций - так называемое «оптическое связывание» (optical binding), которое основано на оптическом управлении силами межчастичного взаимодействия с целью получения устойчивых связанных состояний нескольких наночастиц.

Таким образом, тема диссертационной работы Ципотана А.С. (как важная составная часть темы оптического манипулирования частицами) представляется весьма актуальной.

Автор детально обосновал новое оригинальное решение проблемы нанооптических манипуляций, которое в полной мере может быть реализовано для наночастиц типа полупроводниковых квантовых точек и предполагает выполнение ряда необходимых условий: частицы должны обладать относительно узким изолированным оптическим резонансом, частота лазерного излучения должна быть настроена в дальнее красное крыло линии поглощения и абсолютная величина отстройки частоты излучения от частоты резонанса должна быть значительно меньше резонансной частоты (условие квазирезонансности излучения). При выполнении этих условий и подходящем выборе частоты и интенсивности лазерного излучения, в светоиндуцированном межчастичном потенциале взаимодействия наночастиц могут возникать глубокие минимумы (на межчастичных расстояниях определяемых частотной расстройкой излучения) устраняющие естественные потенциальные барьеры, которые препятствуют образованию связанных состояний двух или нескольких наночастиц. Этот эффект может быть описан посредством корректного учёта сдвига резонанса из-за диполь-дипольного взаимодействия наночастиц в световом поле. Его следствием (как показано автором диссертации) может быть явление самоорганизации наночастиц в устойчивые агрегаты (нанокластеры) при их облучении импульсным лазерным излучением с длительностью порядка десяти наносекунд. Практически важно, что эффект самосборки таких наноструктур достигается при интенсивностях меньших порога фотостабильности полупроводниковых квантовых точек.

Заметим, что само по себе определение конкретных необходимых физических условий приводящих к рассмотренному эффекту светоиндуцированного образования наноструктур является результатом весьма нетривиального и трудоёмкого анализа, так как задачи оптического связывания наночастиц являются многопараметрическими и отклик наночастиц на световое воздействие весьма чувствителен к соотношению между этими параметрами и сильно зависит как от вида частиц так и режимов воздействия.

Несомненным достоинством работы является сочетание теоретического анализа, компьютерного моделирования и эксперимента. Такой комплексный подход к решению рассмотренной задачи обеспечивает высокую степень достоверности и убедительности полученных автором новых результатов в области нанооптических манипуляций.

Диссертация состоит из введения, 4 глав, заключения и списка литературы.

Первая глава посвящена литературному обзору возможных применений наночастиц и структур на их основе. Рассмотрены методы формирования таких структур, и в частности, электронно-лучевые и ионно-лучевые литографии, коллоидная и наносферная литографии, а также перспективные методы формирования структур, основанные на самоорганизации, которая позволяет контролировать, как процесс роста структур, так и их форму.

Во второй главе представлена математическая модель диполь-дипольного взаимодействия пары частиц в квазирезонансном поле лазерного излучения и описаны ее особенности для общего случая, когда параметры частиц (величины матричных элементов дипольного момента квантового перехода, резонансные длины волн и ширины переходов) могут отличаться. Использование названных параметров, полученных на основе экспериментальных данных, позволило рассчитать значения энергии диполь-дипольного взаимодействия, анализ которых приводит к выводу о принципиальной возможности формирования наноструктур в поле лазерного излучения.

Было показано, что наличие полупроводниковой частицы с более узкими, чем у металлических ширинами пика поглощения приводит как к увеличению глубины минимума в энергии взаимодействия, так и уменьшению его спектральной ширины. Кроме того, взаимодействие наведенных на частицах внешним полем диполей приводит не только к возникновению притяжения или отталкивания между частицами, но и изменению спектральных свойств системы.

Третья глава посвящена исследованию влияния фаз колебаний наведенных внешним полем дипольных моментов пары частиц на энергию их взаимодействия во внешнем световом поле и возможности формирования комплексных нанообъектов с заданной геометрической конфигурацией. Здесь описан процесс поэтапного формирования агрегатов из нескольких наночастиц. Сначала подбором частоты и поляризации внешнего светового поля формируется пара частиц, затем уже к готовой паре добавляется третья частица подбором необходимых частоты и поляризации внешнего поля. Проведён расчет спектральной зависимости энергии диполь-дипольного взаимодействия для четырех и пяти частиц, который подтверждает возможность получения сложных наноструктур посредством такого поэтапного их формирования.

В главе 4 приведены результаты компьютерного моделирования броуновской динамики наночастиц со светоиндуцированным диполь-дипольным взаимодействием. Определены значения вероятности и скорости образования пары полупроводниковых наночастиц, а также оптимальные значения частоты лазерного излучения, необходимые для преодоления барьера препятствующего спонтанной агрегации наночастиц. На основе этих расчётов даны оценки параметров среды и поля, при которых возможно экспериментальное наблюдение исследуемых в работе эффектов. В частности установлено, что при объемных концентрациях порядка 10^{-2} время формирования структур составляет величину порядка 10 – 20 нс.

Далее описан физический эксперимент, осуществленный автором диссертации. Эксперименты по формированию наноструктур во внешнем поле проводились с использованием перестраиваемого по частоте параметрического генератора света. Длительность отдельного импульса излучения равнялась 10 нс, частота повторения – 10 Гц, время экспозиции – 5 мин, интенсивность излучения достигала значений порядка 10^6 Вт/см². Для проведения экспериментов по облучению использовались коллоидные растворы квантовых точек при молярной концентрации $C=3 \cdot 10^{-4}$ моль/л. Объем кюветы составлял 100 мкл.

Проведенный спектрально-абсорбционный анализ облученных образцов позволяет утверждать, что в ходе эксперимента по формированию пар от 30 до 50% изначально одиночных частиц агрегируют в пары с межчастичным расстоянием около 11 нм. Полученные в эксперименте результаты хорошо согласуются с проведенными расчетами самоорганизованной агрегации частиц при облучении квазирезонансным лазерным излучением.

Работа является законченной и выполнена автором самостоятельно на высоком научном уровне. Проведенные научные исследования и результаты, полученные на их основе, новы и практически значимы. Представленные в работе исследования достоверны, выводы и рекомендации хорошо обоснованы.

Диссертационная работа основана на достаточно надёжных исходных данных, имеет пояснения, рисунки, графики, примеры, подробные расчеты. Написана технически квалифицированно и аккуратно оформлена. По каждой главе и работе имеются выводы. Работа выполнена с использованием современных методов исследования. Диссертация изложена хорошим и понятным языком, а автореферат полностью соответствует ее содержанию.

Основные результаты работы и научные положения, выносимые на защиту, опубликованы в авторитетных журналах и прошли апробацию на различных российских и международных конференциях.

Вместе с тем работа не свободна от недостатков, по поводу которых можно высказать ряд замечаний.

1. Автор не уделяет должного внимания обсуждению особенностей и пределов применимости используемых математических моделей и приближений. В частности, в работе использовано приближение линейной поляризуемости двухуровневых частиц, которое корректно может быть выведено из оптических уравнений Блоха при условии малости параметра насыщения

квантового перехода. Это условие может нарушаться при межчастичных расстояниях, при которых абсолютная величина частотной отстройки от резонанса сравнима с величиной сдвига частоты резонанса из-за взаимодействия. Хотя по моим оценкам, учёт нелинейностей не разрушает главный эффект рассмотренный в диссертации, необходимо констатировать, что основная модель требует усовершенствования для более точного вычисления потенциальной функции межчастичного взаимодействия при указанных межчастичных расстояниях.

2. Вывод выражения, связывающего величину квадрата модуля матричного элемента дипольного момента перехода с сечением поглощения, логично было бы выводить непосредственно из выражения для линейной поляризуемости, которое используется в работе. Мой анализ показывает, что в этом случае получилось бы несколько большее значение квадрата модуля матричного элемента, чем указано в диссертации.

Можно также отметить ряд опечаток:

1. В формуле (5) не определены величины d_1 и d_2 , поэтому для её понимания приходится обращаться к оригинальной статье автора.

2. На странице 39 неверно указаны единицы измерения сечения поглощения (см^2 вместо м^2).

3. Аналогичная описка имеет место на стр. 9 автореферата.

4. В автореферате не приведено определение угла Θ , задающего конфигурацию структуры из трёх наночастиц, что не очень удобно, поскольку заставляет обращаться к первоисточнику.

5. В правой части формулы (11) величина ширины резонанса должна находиться в числителе.

Отмеченные недостатки не снижают высокой оценки объема выполненной работы и качества результатов, полученных соискателем. Тема диссертации соответствует формуле и п.6 Паспорта специальности 01.04.05 – оптика.

Диссертация отвечает всем требованиям Положения о порядке присуждения ученых степеней, ее автор Ципотан Алексей Сергеевич, безусловно, заслуживает присуждения ему ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.05 – Оптика.

Ведущий научный сотрудник отдела вычислительной
физики Института вычислительного моделирования
СО РАН,
д.ф.-м.н., профессор



Краснов И.В.

Подпись И.В. Краснова заверяю

Ученый секретарь ИВМ СО РАН
к.ф.-м.н.



Вяткин А.В.

Краснов Игорь Васильевич

Академгородок, д. 50, стр. 44, Красноярск, 660036, ИВМ СО РАН,
тел. (3912) 494722, e-mail: krasn@icm.krasn.ru

**Список основных публикаций Краснова И. В.
за последние пять лет
по теме диссертации Ципотана А.С.**

1. Krasnov I. V. *Conditions for formation and trapping of the two-ion Coulomb cluster in the dissipative optical superlattice* // **Chin. Phys. B.** – 2015. – V. 24. – N. 6. – p. 063701.
2. Krasnov I. V., Kamenshchikov L. P. *All-optical trapping of strongly coupled ions* // **Optics Comm.** – 2014. – V. 312. – p. 192-198.
3. Krasnov I. V. *Bichromatic optical tractor beam for resonant atoms* // **Physics Letters A.** – 2012. – V. 376. – Iss. 42-43. – p. 2743-2749.
4. Krasnov I. V. *Three-dimensional localization of atoms in the polychromatic optical superlattice* // **Physics Letters A.** – 2011. – V. 375. – Iss. 24. – p. 2471-2478.

Ведущий научный сотрудник ИВМ
СО РАН,
д.ф.-м.н., профессор



Краснов И.В.

Список публикаций И.В. Краснова заверяю:

Ученый секретарь ИВМ СО РАН,
к.ф.-м.н.



Вяткин А.В.