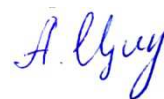


На правах рукописи



Ципотан Алексей Сергеевич

**САМОСБОРКА НАНОСТРУКТУР В ПОЛЕ КВАЗИРЕЗОНАНСНОГО
ЛАЗЕРНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ**

01.04.05 – Оптика

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Красноярск – 2015

Работа выполнена в Федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего профессионального образования Сибирский федеральный университет.

Научный руководитель: доктор физико-математических наук, профессор
Слабко Виталий Васильевич

Официальные оппоненты: *Краснов Игорь Васильевич, доктор физико-математических наук, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт вычислительного моделирования Сибирского отделения Российской академии наук, ведущий научный сотрудник;*

Эдельман Ирина Самсоновна, доктор физико-математических наук, профессор, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт физики им. Л. В. Киренского Сибирского отделения Российской академии наук, главный научный сотрудник.

Ведущая организация: *Национальный исследовательский Томский государственный университет, г. Томск*

Защита состоится «___» _____ 2015 г. в ___ часов на заседании диссертационного совета Д003.055.01 при Институте физики им. Л. В. Киренского СО РАН по адресу: 660036, г. Красноярск, Академгородок, 50, стр. 38. Институт физики им. Л. В. Киренского СО РАН.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Института физики им. Л.В.Киренского СО РАН.

Автореферат разослан «___» _____ 2015 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета,
доктор физико-математических наук



Втюрин А.Н.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность

Уменьшение материальных объектов до нанометровых размеров приводит к кардинальному изменению его свойств [1]. Исследование этих свойств, и создание на их основе практически значимых наноэлементов [2-6] с уникальными свойствами определяет, и на ближайшие годы будет определять основное направление развития науки о материалах. Основной проблемой развития в этом направлении является отсутствие простых методов, допускающих реплицирование наноструктур, аналогичных фотолитографическим [7], лежащим в основе современной микроэлектроники, продвижение которых в нанометровый диапазон ограничено дифракционным пределом. Использование более коротковолнового излучения [8,9] и альтернативных способов экспонирования [10, 11] позволило уменьшить размеры получаемых структур, что однако не решает всех проблем из-за технических сложностей при их реализации. В связи с этим поиск, обоснование и исследование нетрадиционных подходов к формированию наноструктур с заданными параметрами приобретает первостепенную актуальность и практическую значимость.

Перспективным направлением решения названных проблем, выглядит явление самоорганизации широко распространенное в живой природе, позволяющее естественным образом формировать и воспроизводить очень сложные функциональные структуры. Очевидно, что при самоорганизованной сборке не требуется применения дополнительных технологических приемов, а реплицирование достигается автоматически. Недостатком самоорганизации, основанной на химических взаимодействиях [12-14], является специфичность таких взаимодействий, приводящих к самоорганизованной сборке органических структур и трудности их воспроизведения при необходимости использования неорганических материалов. Естественным развитием направления, связанного с самоорганизацией представляет самосборка,

основанная на физических воздействиях [15-17]. При использовании таких методов возможно получение воспроизводимых результатов, однако в отличие от химической самоорганизации, они позволяют создавать структуры из материалов различной природы. При этом разработка поэтапного метода синтеза структур под действием контролируемого физического воздействия, позволила бы получать сверхминиатюрные устройства, свойства которых задаются в процессе роста. Однако, физическое воздействие должно обладать как селективностью по отношению к элементам из которых собирается наноструктура, так и к пространственному расположению этих элементов в формируемом объекте. Поэтому значительных и многообещающих результатов в этом направлении к настоящему времени получено не было.

В данной диссертации рассматривается возможность реализации поэтапного метода самоорганизации металлических и полупроводниковых наночастиц во внешнем поле квазирезонансного лазерного излучения. Геометрию а, следовательно, и свойства получаемых структур, можно контролировать в процессе роста, подбирая два независимых параметра внешнего поля, его частоту и поляризацию. Сказанное выше в достаточной мере обосновывает **актуальность** проведенных исследований и их **практическую значимость**.

Цель диссертационной работы – расчетно-теоретически и экспериментально подтвердить возможность реализации управляемой внешним квазирезонансным лазерным излучением самоорганизованной агрегации наночастиц в структуры с заранее задаваемой геометрией.

Для достижения поставленной цели были сформулированы следующие задачи:

-Проанализировать свойства наночастиц, обладающих оптическими резонансами (полупроводники, металлы и допированные диэлектрики), и выбрать объекты для расчетно-теоретических и экспериментальных исследований.

-Разработать математическую модель и провести расчетно-теоретические исследования возможности формирования структур, состоящих из двух и более частиц, в диполь-дипольном приближении.

-С помощью броуновской динамики оценить необходимые параметры среды и поля для проведения экспериментов по формированию пар из наночастиц CdTe.

-Провести эксперименты по формированию структур в поле лазерного излучения на основе полученных оценок с использованием выбранных объектов.

Научная новизна

-Впервые в диполь-дипольном приближении показаны особенности, возникающие при взаимодействии частиц с различающимися ширинами переходов в поле квазирезонансного лазерного излучения, связанные с возникновением разности фаз колебаний наведенных дипольных моментов на частицах. Это приводит к возникновению дополнительных минимумов и максимумов в энергии взаимодействия, а так же особенностей в спектре поглощения, аналогичных резонансу Фано.

-Показана возможность поэтапного формирования заданных структур состоящих из трех и более частиц. Введен параметр, позволяющий количественно охарактеризовать угловую селективность формирования структуры, в зависимости от ее конфигурации и ширин переходов изолированных наночастиц.

-Впервые экспериментально продемонстрировано самоорганизованное формирование пар коллоидных квантовых точек, индуцированное импульсным квазирезонансным лазерным излучением с параметрами, соответствующими ранее проведенным расчетам. Наличие пар в облученном образце определялось изменением в спектрах поглощения.

Практическая значимость и использование результатов работы.

Результаты, полученные в диссертационной работе, могут быть использованы при разработке методов и технологий формирования

наноструктур с заданными параметрами для создания устройств нано-фотоники, электроники и сенсорики, а также в ряде других приложений.

Достоверность полученных результатов обеспечена обоснованностью использованных в работе экспериментальных и теоретических методик исследования, их совпадением, в предельных случаях с результатами работ других авторов и хорошей воспроизводимостью экспериментальных результатов.

Научные положения, выносимые на защиту

- Глубина потенциальной ямы энергии наведенного диполь-дипольного взаимодействия зависит от ширин резонансов взаимодействующих частиц и может значительно превышать энергию теплового движения при интенсивности лазерного излучения ниже порога устойчивости частиц.

- Возможно поэтапное формирование наноструктур с заданной конфигурацией из наночастиц в поле квазирезонансного лазерного излучения, при соответствующем выборе его поляризации и частоты.

- В соответствии с ранее проведенными расчетами и оценками, использование в качестве источника, индуцирующего процесс самоорганизации лазерного излучения длительностью порядка 10^{-8} с и интенсивностью около 10^6 Вт/см² с длиной волны, лежащей в красной области относительно длинноволнового резонанса квантовой точки, приводит к формированию экспериментально регистрируемых пар частиц.

Личный вклад соискателя заключается в постановке, совместно с научным руководителем, цели и задач исследования; в моделировании процессов взаимодействия частиц в поле лазерного излучения; проведении экспериментов по формированию пар частиц во внешнем квазирезонансном поле; исследованию спектральных свойств полученных образцов; анализе и интерпретации полученных данных; в подготовке научных статей и тезисов докладов, отражающих основные результаты исследования.

Апробация результатов работы

Основные результаты работы были представлены и обсуждены на 18ой

Всероссийской научной конференции студентов-физиков и молодых ученых, (ВНКСФ-18), Красноярск, 29 марта – 5 апреля 2012 г; 50ой юбилейной международной научной студенческой конференции «Студент и научно-технический прогресс», (МНСК-2012), Новосибирск, 13 – 19 апреля 2012 г; 15ой международной конференции Laser Optics – 2012, Санкт-Петербург, 25-29 июня 2012 г; Международной молодежной конференции по Люминесценции и лазерной физике, оз. Байкал, 16-22 июля 2012 г; 2ой международной конференции «Оптика и фотоника-2013», Самарканд, 25-27 сентября 2013 г; 16ой международной конференции Laser Optics – 2014, Санкт-Петербург, 30 июня– 4 июля 2014 г.

Работа поддержана грантами: РФФИ в рамках научного проекта №. 14-02-00219 А, МинОбрНауки РФ №3.1749.2014/К, внутренним грантом Сибирского федерального университета Ф-12, ФЦП «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» соглашение № 14.А18.21.1942 от 14.11.12г., DAAD (Германская служба академических обменов) «Научно-исследовательские стипендии для молодых ученых».

Публикации

По теме диссертации опубликовано 4 научных работы: 2 статьи в периодических изданиях по списку ВАК, 2 статьи в зарубежных журналах и 8 работ в сборниках тезисов международных и всероссийских конференций.

Соответствие диссертации паспорту специальности

Содержание диссертации соответствует формуле и п.6 Паспорта специальности 01.04.05 Оптика: «Действие света. Передача энергии-импульса, динамические процессы при взаимодействии света с веществом, процессы выделения энергии веществом при световом воздействии. Световое управление движением и квантовым состоянием атомов. Фотоэлектрические явления. Фотохимические процессы. Детектирование излучения. Самовоздействие света в среде. Нелинейная оптика. Распространение оптических импульсов сверхвысоких мощностей и сверхмалых длительностей.»

Объем и структура диссертации

Материалы диссертационной работы изложены на страницах основного текста 117, рисунков 31, таблиц 2. Работа состоит из введения, четырех разделов, основных выводов, списка литературы.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обосновывается актуальность выбранной диссертационной темы исследования, сформулированы цели и задачи, отражена научная новизна и практическая значимость полученных результатов, приведены научные положения, выносимые на защиту, личный вклад соискателя, а также апробация работы и структура диссертации.

Первая глава посвящена литературному обзору возможных применений наночастиц и структур на их основе. Рассмотрены методы формирования таких структур, и в частности, электронно- 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. Большое внимание уделено обзору работ, посвященных оптическим свойствам малых частиц металлов, полупроводников и диэлектриков, допированных ионами редкоземельных металлов, являющихся объектом исследования в данной диссертации.

Во второй главе представлена математическая модель диполь-дипольного взаимодействия пары частиц в квазирезонансном поле лазерного излучения и рассмотрен ее вид для общего случая, когда параметры частиц (величина электродипольного момента 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 позволяет говорить о принципиальной возможности формирования структур в поле лазерного излучения.

Для количественной оценки энергии взаимодействия использовались следующие экспериментальные данные [18, 19], которые позволяют оценить сечения и спектры поглощения наночастиц CdSe ($\sigma_3 = 2,7 \cdot 10^{-16} \text{ см}^2$), уширенные за счет полидисперсности. При этом неоднородная за счет полидисперсности ширина спектра, наблюдаемая в эксперименте $\Delta\omega$, составляет величину

порядка $2,2 \cdot 10^{14}$ Гц ($\Delta\lambda=40$ нм). Эти данные позволяют оценить значения квадрата модуля электродипольного момента перехода $|d_{12i}|^2$ для полупроводниковых наночастиц

Приведенные в литературе экспериментальные данные позволили оценить необходимые для расчетов параметры частиц:

-для полупроводниковых наночастиц CdSe мы ограничимся учетом наиболее ярко выраженного, длинноволнового экситонного перехода, резонансная длина волны, соответствующая $\omega_{01} - \lambda_{01}=590$ нм, ширина линии – $\Delta\lambda_1 = 3$ нм, размер – $R_1 = 5$ нм и квадрат модуля электродипольного момента перехода $|d_{12}|_1^2 = 1.91 \cdot 10^{-31}$ эрг·см³ [18, 19], и для наночастиц гидрозолей серебра характерные экспериментальные значения – $\lambda_2 = 420$ нм, $\Delta\lambda_2 = 90$ нм, $R_2 = 6$ нм, $|d_{12}|_2^2 = 3.12 \cdot 10^{-30}$ эрг·см³. В расчётах использовалась лоренцевская аппроксимация контуров поглощения невзаимодействующих частиц.

Невысокие значения энергии взаимодействия и большие ширины максимумов и минимумов связаны с большой шириной плазмонного резонанса металлических частиц. При этом увеличение глубины потенциальной ямы за счет увеличения интенсивности для случая взаимодействия металлических частиц невозможно, поскольку используемая в расчетах величина интенсивности внешнего поля уже соответствует предельным значениям для металлических частиц [20]. Улучшить характер такого взаимодействия, можно используя частицы с узкими резонансами.

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 (рисунок 1).

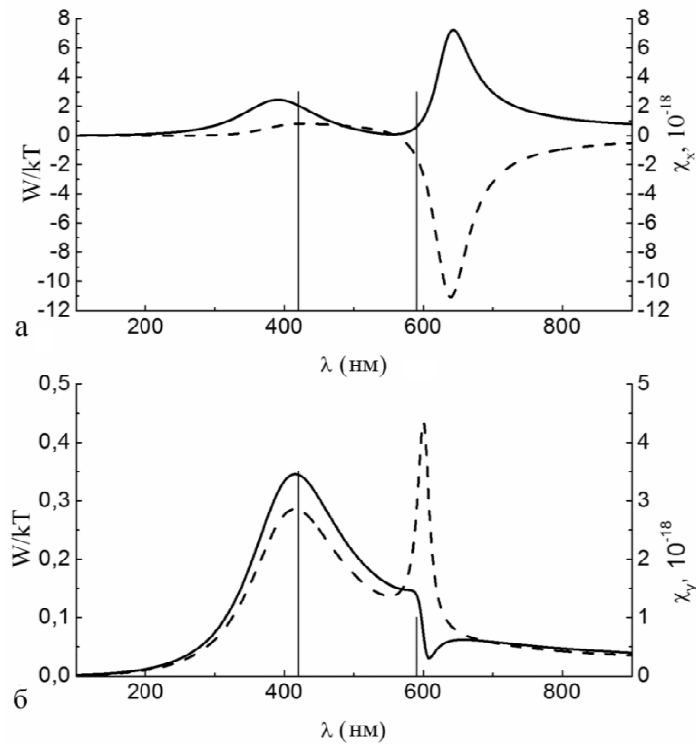


Рисунок 1. Зависимость мнимой части восприимчивости пары частиц (сплошная линия) – χ'' , ответственной за поглощение, и энергии диполь-дипольного взаимодействия частиц, отнесенной к энергии теплового движения, (штриховая линия) – W/kT от частоты внешнего поля. Вертикальные линии соответствуют резонансным частотам невзаимодействующих частиц. Рисунок (а) – внешнее поле направлено под углом $\alpha=0^\circ$; (б) – внешнее поле направлено под углом $\alpha=90^\circ$

Зависимость мнимой части восприимчивости, ответственной за поглощение, от длины волны внешнего излучения существенно отличается как от аналогичной зависимости невзаимодействующих частиц, так и для x ($\alpha=0^\circ$) и y ($\alpha=90^\circ$) компонент поля. Особенно хорошо это заметно для x компоненты, которая имеет два ярко выраженных максимума, частоты и ширины которых существенно отличаются от аналогичных величин для невзаимодействующих частиц. Отметим, что сдвиг резонансных частот обусловлен взаимодействием между частицами и зависит от ширин Γ_1 и Γ_2 , резонансных частот невзаимодействующих частиц и от электродипольных моментов перехода $|d_{12}|^2_1$ и $|d_{12}|^2_2$. В случае y компоненты смещение резонансных частот не очень велико. Однако, характерная особенность в виде провала в области 600 нм мнимой части восприимчивости для y компоненты поля (рисунок 1б), имеющая вид

резонанса Фано, отражает интерференционную природу взаимодействия пары частиц с различными резонансными частотами и ширинами перехода.

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 структур с задаваемой геометрией в ходе поэтапного процесса.

На примере взаимодействия частиц с различающимися электродипольными моментами переходов, резонансными длинами волн и ширинами переходов показано, как возникновение разности фаз колебаний наведенных дипольных моментов влияет на спектральную и угловую зависимость энергии диполь-дипольного взаимодействия.

Возникновение потенциальной ямы при значении угла $\alpha=90^\circ$ обусловлено сдвигом фаз колебаний наведенных дипольных моментов частиц на величину близкую к π . Увеличение разности между резонансными длинами волн частиц приводит к уменьшению глубины возникающей потенциальной ямы в спектральной зависимости энергии взаимодействия. При этом разность фаз колебаний, в зависимости от разности резонансных длин волн частиц, быстро увеличивается от нуля до величины близкой к π и в дальнейшем слабо меняется.

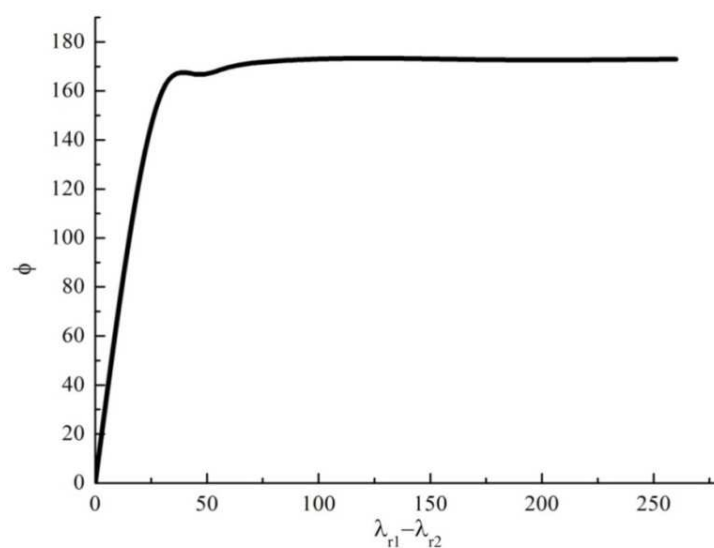


Рисунок 2. Зависимость разности фаз колебаний дипольных моментов от разности резонансных длин волн частиц

Рассмотрен поэтапный процесс формирования структур, в котором к уже образовавшейся паре частиц, под заранее заданным углом присоединяется третья.

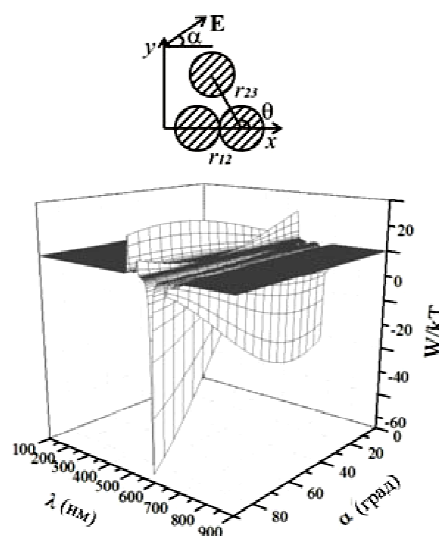


Рисунок 2. 3D зависимость энергии взаимодействия полупроводниковой наночастицы присоединенной к паре агрегированных полупроводниковых наночастиц в зависимости от длины волны лазерного излучения и угла α

Возможность селективного формирования структур с заранее заданной конфигурацией (θ) может быть количественно описана параметром угловой селективности. Данный параметр определяется как угловая ширина $\Delta\theta$ потенциальной ямы на уровне $1kT$ больше минимального значения глубины потенциальной ямы. Измерения на уровне $1 kT$ от минимума потенциальной позволяет определить насколько устойчивой является та или иная конфигурация в условии термодинамического равновесия с окружающей средой.

Таблица 1. Угловая ширина $\Delta\theta$ и глубина потенциальной ямы для различных наборов частиц, конфигураций структур и поляризаций внешнего поля α (пояснить mms, sss и пр.)

θ_0	α	mms		ssm		sss	
		0°	90°	0°	90°	0°	90°
0°	$\Delta\theta$	7.4°	-	12.5°	-	4.7°	-
	$ W_{\min} $	4.1	-	20.8	-	109	-
90°	$\Delta\theta$	-	-	-	16.7°	2.7°	1.0°
	$ W_{\min} $	0.59	5.5	1.4	6.5	10.04	61.2
120°	$\Delta\theta$	3.4°	-	-	2.1°	0.19°	0.22°
	$ W_{\min} $	1.6	23.4	1.3	5.4	41.6	71.8

Введенный параметр спектральной селективности $\Delta\theta$, зависит как от характеристик выстраиваемой структуры и частиц, из которых она формируется, так и от интенсивности внешнего лазерного излучения, поэтому этот параметр может быть уменьшен при увеличении последней. Очевидно, что сравнивать эти параметры для различных конфигураций возможно только при одной и той же интенсивности. Несмотря на некоторую условность этого параметра, введение его является целесообразным, поскольку он хорошо коррелирует со спектральной шириной потенциальной кривой взаимодействия частиц в выбранной конфигурации, что имеет существенное значение при оценке возможности создания той или иной структуры.

Процесс формирования агрегатов из большого числа частиц в данной работе рассматривается как поэтапный. 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. Расчет спектральной зависимости энергии диполь-дипольного взаимодействия для четырех и пяти частиц, показал возможность получения таких структур в ходе поэтапного формирования начиная с структуры, состоящей из пары частиц.

В главе 4 в рамках броуновской динамики с учетом наведенного внешним полем диполь-дипольного взаимодействия рассматривается модель агрегации наночастиц в поле лазерного излучения. Получены значения вероятности и скорости образования пары полупроводниковых наночастиц, а так же оптимальные значения частоты лазерного излучения, необходимые для преодоления барьера препятствующего спонтанной агрегации, в рамках модели описанной в Главе 2. Это позволило оценить требуемые параметры среды и поля для проведения экспериментов по самосборке частиц.

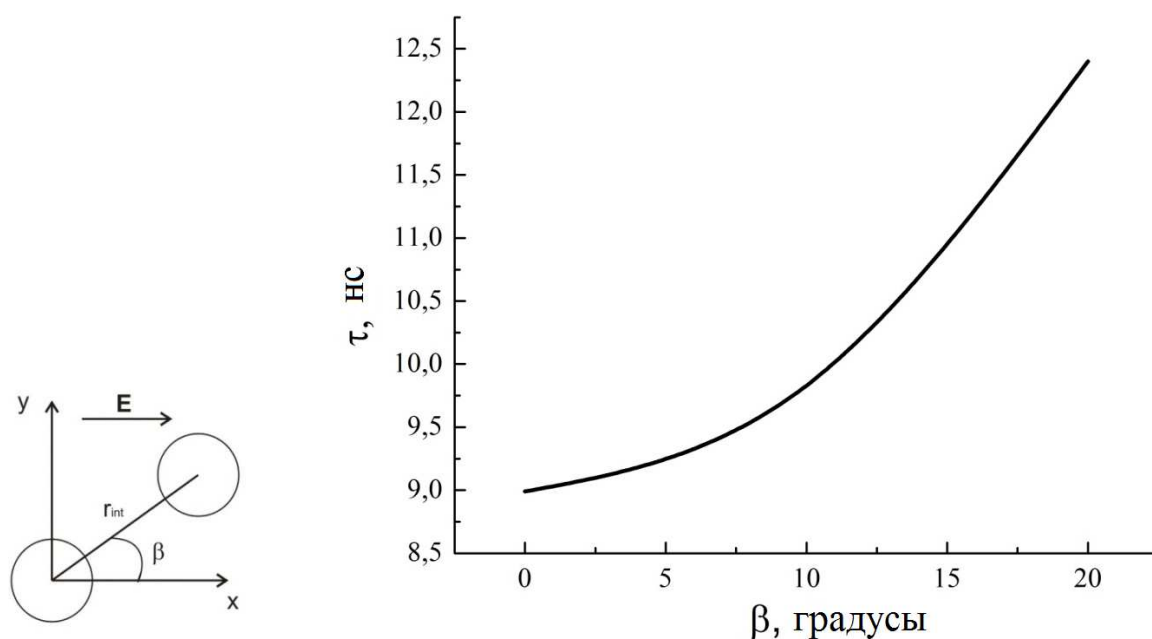


Рисунок 4. Зависимость времени формирования структуры от угла β

Было показано, что при объемных концентрациях порядка 10^{-2} время формирования структур составляет величину порядка 10-20 нс. Это позволяет использовать при проведении эксперимента импульсный лазер с перестраиваемой частотой генерации в видимом диапазоне, работающий в режиме модуляции добротности с частотой повторения импульсов до 10^4 - 10^5 Гц.

Для проведения экспериментов по формированию структур с заранее заданной конфигурацией квантовые точки CdTe@TGA+TEA были синтезированы в Технологическом университете Дрездена по широко распространенной методике синтеза водорастворимых квантовых точек CdTe [21]. Стабилизация осуществлялась за счет молекул тиагликолевой кислоты и триэтаноламина. Анализ спектров поглощения позволяет утверждать, что диаметр синтезированных квантовых точек CdTe@TGA+TEA составляет величину около 2,9 нм. Для данных частиц была проведена аттестация по размерам с помощью динамического светорассеивания. Результаты этих измерений приведены на рисунке 5, и указывают на то, что в коллоидном растворе преобладают структуры с распределением по размерам, близким к Гауссову с максимумом около 108 нм и шириной 30 нм на полувысоте

(измерения проводились с использованием прибора Zetasizer Nano фирмы Malvern).

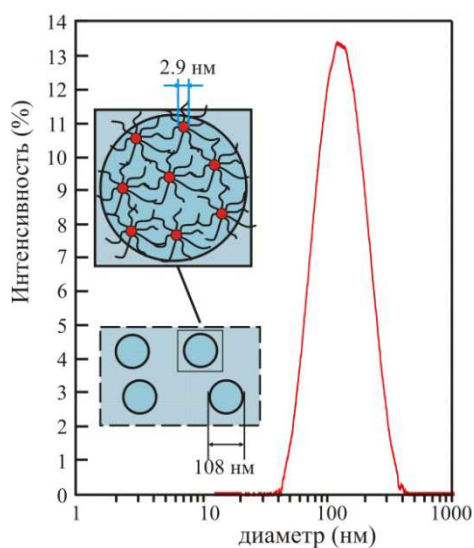


Рисунок 5. Распределение квантовых точек CdTe@TGA+TEA по размерам.

Последнее означает, что квантовые точки CdTe@TGA+TEA совместно с молекулами тиагликолевой кислоты и триэтаноламином в воде с $\text{pH}=12$ со временем образуют гелеподобные конгломераты с указанными выше размерами. Поскольку спектр поглощения соответствует невзаимодействующим частицам, это дает возможность дать оценку минимального среднего расстояния между частицами в конгломерате. Легко показать, что эта величина не может быть меньше 20 нм.

Эксперименты по формированию структур во внешнем поле проводились с использованием перестраиваемого по частоте параметрического генератора света (Vibrant 365 фирмы Opotec). Длительность импульса составляла величину 10 нс, что позволяет, исходя из средней энергии импульса близкой к 15 мДж оценить среднюю мощность излучения в импульсе на длинах волн облучения ($15 \cdot 10^5$ Вт). Частота повторения 10 Гц, время экспозиции составляло 5 мин, что соответствует 3000 импульсов. Излучение лазера фокусировалось линзой с фокусным расстоянием 75 мм на поверхность водного раствора квантовых точек, помещенного в открытую фторопластовую кювету. Изменение интенсивности облучения осуществлялось перемещением кюветы

относительно фокального пятна. Приведенные ниже данные получены при оцененной средней интенсивности на образце около $4,2 \cdot 10^6$ Вт/см², что вполне соответствует расчетным данным. 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.

Спектры поглощения образцов после облучения на различных длинах волн приведены на рисунке 6.

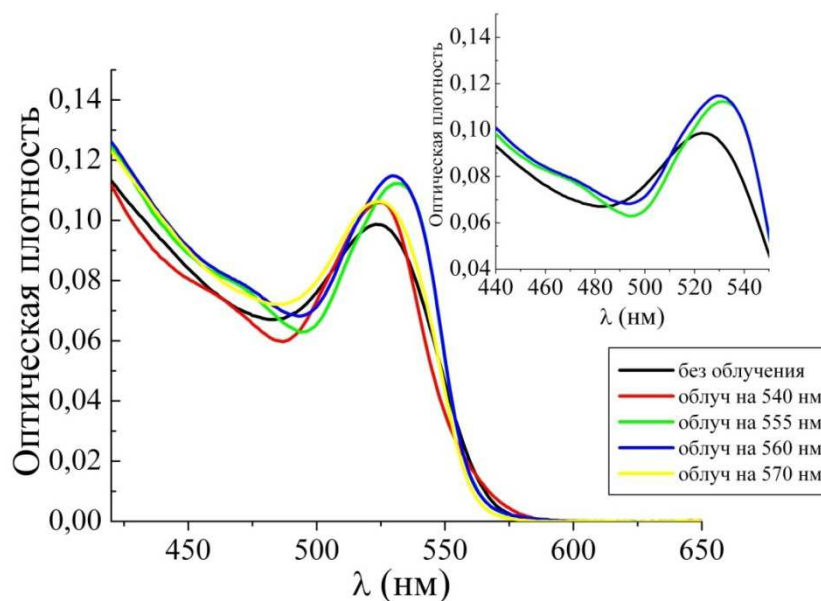


Рисунок 6. Спектры поглощения коллоидных растворов CdTe@TGA+TEA после облучения на различных длинах волн

Как видно из рисунка, воздействие лазерного излучения на длинах волн в области 555 и 560 нм приводило к сдвигу максимума полосы поглощения в красную область спектра и возникновению дополнительного максимума поглощения в синей области. Наличие этих особенностей хорошо описывается на основе следующих соображений. При наличии в исследуемом образце структуры, состоящей из пары частиц, спектр его поглощения будет иметь сложный характер, обусловленный тремя полосами поглощения. Центральная полоса поглощения будет соответствовать непроагрегировавшим изолированным частицам, а две крайние полосы – агрегатам, состоящим из пар частиц. Вычитанием из спектра поглощения образца спектра поглощения изолированных частиц можно получить усредненный по ориентациям спектр

пары частиц, что будет свидетельствовать о ее наличии, а также позволяет получить количественные оценки числа образовавшихся пар (рисунок 7).

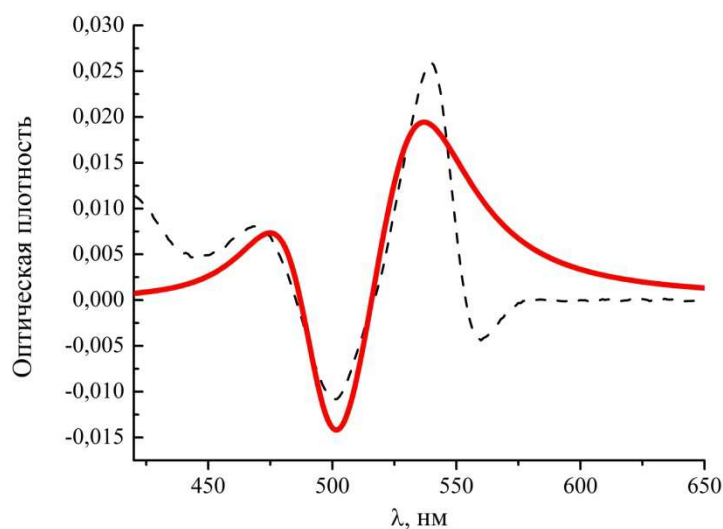


Рисунок 7. Экспериментальный (пунктирная кривая) и модельный (сплошная кривая) разностные спектры для образца, облученного на длине волны 555

Модельные кривые были построены с помощью метода наименьших квадратов. Суть метода заключается в следующем: варьируя такие модельные параметры как расстояния между частицами в сформированной паре и вклад спектров одиночных частиц и пар, что позволяет оценить процент прореагировавших частиц, добивались минимальной разницы квадратов экспериментального и теоретического значения оптической плотности для всего диапазона значений. Так для длины волны облучения 555 нм число прореагировавших одиночных частиц соответствует примерно 46,8% от их начального количества. Модельные кривые соответствуют расстоянию между частицами в паре r близкому к 11 нм. Таким образом, результаты экспериментов наглядно продемонстрировали возможность реализации предложенного в работе подхода к формированию наноструктур.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ

1. В рамках диполь-дипольного взаимодействия и двухуровневой схемы показана принципиальная возможность формирования структур с заранее заданной геометрией во внешнем квазирезонансном поле из полупроводниковых и металлических наночастиц при интенсивностях поля ниже порога разрушения.

2. Показано, что уменьшение ширины резонанса изолированной частицы на порядок приводит к увеличению энергии взаимодействия также на порядок. При этом, спектральная селективность формирования структуры, состоящей из пары частиц, также увеличивается за счет уменьшения спектральной ширины потенциальной ямы.

3. При переходе через резонанс разность фаз колебаний наведенных дипольных моментов может изменяться на величину близкую к π , что является причиной возникновения дополнительных минимумов или максимумов в энергии взаимодействия.

4. Существует принципиальная возможность получения структуры, состоящей из трех и более частиц, в ходе поэтапного процесса их самосборки из уже сформированной пары при соответствующем подборе длины волны и ориентации вектора напряженности электрической компоненты внешнего лазерного излучения относительно формируемой структуры.

5. Для объемной концентрации частиц в растворе 10^{-2} , вязкости среды $\eta=0,8902$ мПа•с и комнатной температуре время формирования пары частиц в поле лазерного излучения интенсивностью близкой к 10^6 Вт/см² составляет величину около десяти наносекунд. Это позволяет для осуществления процесса образования пары использовать коммерческий параметрический генератор света.

6. Спектрально-абсорбционный анализ позволяют утверждать, что в ходе эксперимента по формированию пар от 30 до 50% изначально одиночных частиц агрегируют в пары с межчастичным расстоянием около 11 нм.

7. Полученные в эксперименте результаты находятся в хорошем согласии с ранее проведенными расчетами самоорганизованной агрегации частиц в поле квазирезонансного лазерного излучения.

ПУБЛИКАЦИИ АВТОРА ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

1. Slabko, V.V. Dynamics of self-organized aggregation of resonant nanoparticles in a laser field /V. V. Slabko, A. S. Tsipotan, A. S. Aleksandrovsky, E. A. Slyusareva// Appl. Phys . B.– 2014.– V.117.– P. 271–278.
2. Ципотан, А.С. Управляемая самоорганизация квазирезонансных наночастиц в поле лазерного излучения /А.С. Ципотан, А.С. Александровский, Н.Э. Лямкина, В.В. Слабко// **Известия ВУЗов: Физика.**– 2013.– Т. 56.– Вып.(2/2).– С. 314-319.
3. Слабко, В.В. Управляемая внешним квазирезонансным полем самоорганизованная агрегация пары частиц с разными резонансными частотами и электродипольными моментами переходов/ В.В. Слабко, А.С. Ципотан, А.С. Александровский// **Квант. электроника.**– 2013.– Т.43.–Вып.5.– С. 458–462.
4. Slabko, V.V. Resonant light-controlled self-assembly of ordered nanostructures/ V. V. Slabko, A. S. Tsipotan, A. S. Aleksandrovsky// **Photonics and Nanostructures – Fundamentals and Applications.**–2012.– V.10.– P. 636–643.
5. Slabko, V.V. Self-organized aggregation simulation of resonant nanoparticles in a laser field /V.V. Slabko, A.S. Tsipotan, M.A. Gerasimova, A.S. Aleksandrovsky// Материалы международной конференции Laser Optics.– Санкт-Петербург.– 2014.
6. Слабко, В.В. Самоорганизованная агрегация наночастиц, контролируемая резонансным лазерным излучением/ В.В. Слабко, А.С. Александровский, А.С. Ципотан// Материалы 2-ой международной конференции «Оптика и фотоника-2013».– Самарканд: издательство СамГУ.– 2014.– С. 133-136.
7. Алаторцев, М.Н. Влияние расстояния между парой наночастиц на резонансную частоту и энергию связи системы/ М.Н. Алаторцев, А.С. Ципотан// Сборник тезисов, материалы ВНКСФ-19.– Архангельск: издательство АСФ России.– 2013.– С. 234-235.
8. Ципотан, А.С. Контролируемое лазерным излучением формирование наноструктур с заданной топологией// А.С. Ципотан, Н.Э.Лямкина, А.В.Шамшуринов// Труды Всероссийской конференции VI Ставеровские чтения.– Красноярск: Сиб. Федер. ун-т.– 2012.– С. 81-83.
9. Слабко, В.В. Управляемая самоорганизация квазирезонансных наночастиц в поле лазерного излучения/ В.В. Слабко, А.С. Ципотан, Н.Э. Лямкина// Сборник докладов Международной молодежной конференции по Люминесценции и лазерной физике.– Иркутск: издательство ИГУ.– 2012.– С. 160.
10. Slabko, V.V. Resonant light-controlled self-assembly of ordered nanostructures /V.V. Slabko, A.S. Tsipotan, A.S. Aleksandrovsky// Материалы международной конференции Laser Optics.– Санкт-Петербург.– 2012.
11. Ципотан, А.С. Формирование упорядоченных структур резонансными частицами в поле лазерного излучения/ А.С. Ципотан, В.В. Слабко// Материалы 50-й Международной научной студенческой конференции «Студент и научно-

технический прогресс»: Физика неравновесных процессов.— Новосибирск: Редакционно-издательский центр НГУ.— 2012.— С. 105.

12. Ципотан, А.С. Эффекты диполь-дипольного взаимодействия пары резонансных наночастиц в поле лазерного излучения/ А.С. Ципотан, Б.С. Жамсуев, В.В. Слабко// материалы «Восемнадцатой Всероссийской научной конференции студентов-физиков и молодых ученых» (ВНКСФ-18).— Красноярск: издательство АСФ России.— 2012.— С. 380-381.

СПИСОК ЦИТИРУЕМОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Eustis, S. Why gold nanoparticles are more precious than pretty gold: Noble metalsurface plasmon resonance and its enhancement of the radiative and nonradiative properties of nanocrystals of different shapes/ S. Eustis, M. A. El-Sayed// Chem. Soc. Rev.— 2006.— V.35.— P. 209–217.

2. Stewart, M. E. Nanostructured Plasmonic Sensors/ M. E. Stewart, C. R. Anderton, L. B. Thompson // Chem. Rev.— 2008.—V.108.— P. 494-521.

3. Fang, M. Quantum Dots for Cancer Research: Current Status, Remaining Issues, and Future Perspectives/ M. Fang, C.-W. Peng, D.-W. Pang, et.al.// Cancer Biol Med.— 2012.— V.9— P. 151-163.

4. Tang, J. Schottky Quantum Dot Solar Cells Stable in Air under Solar Illumination/ J. Tang, X. H. Wang, L. Brzozowski, et.al.// Adv. Mater.—2010.—V.22.— P. 1398 –1402.

5. Schuller, J. A. Plasmonics for extreme light concentration and manipulation/ J. A. Schuller, E. S. Barnard, W. Cai// Nature materials.—2010. — V.9.— P. 193-204.

6. Zabet-Khosousi, A. Charge Transport in Nanoparticle Assemblies/ A. Zabet-Khosousi, Al-Amin Dhirani// Chemical Reviews.—2008.— V.108.— N.10.— P. 4072-4124.

7. Boor, J.D. Sub-50 nm Patterning by Immersion Interference Lithography Using a Littrow Prism as a Lloyd's Interferometer/ J.D. Boor, D.K. Kim, V. Schmidt// Optics Letters.— 2000.— V.35.— N.20.— P. 3450–3452.

8. Yamazaki, K. 5-nm-Order Electron-Beam Lithography for Nanodevice Fabrication/ K. Yamazaki, H. Namatsu// *Jpn. J. Appl. Phys.*—2004.— V.43.— P. 3767.

9. Gierak, J. Optimization of experimental operating parameters for very high resolution focused ion beam applications/ J. Gierak, C. Vieu, M. Schneider, // Vac. Sci. Technol. B.— 1997.— V.15— P.2373.

10. Haynes, C. L. Nanosphere Lithography: A Versatile Nanofabrication Tool for Studies of Size-Dependent Nanoparticle Optics/ C. L. Haynes, R. P. Van Duyne// J. Phys. Chem. B.—2001.—V.105. P. 5599.

11. Hanarp, P. Control of nanoparticle film structure for colloidal lithography/ P. Hanarp, D. S. Sutherland, J. Gold, et.al.// Colloids Surf., A.— 2003.—V.214.— P. 23.

12. Boal, A. K. Self-assembly of nanoparticles into structured spherical and network aggregates/ A. K. Boal, F. Ilhan, J. E. DeRouchey, et.al./ Nature.— 2000.— V.404.— Is.6779.— P. 746-748.

13. Kinge, S. Self-Assembling Nanoparticles at Surfaces and Interfaces/ S. Kinge, M. Crego-Calama, D. N. Reinhoudt// *Chemphyschem.*– 2008.– V. 9.– Is. 1.– P. 20-42.
14. Noh, K.-J. Photoelectrochemical Properties of Fe₂O₃ Supported on TiO₂-Based Thin Films Converted from Self-Assembled Hydrogen Titanate Nanotube Powders/ K.-J. Noh, H.-J. Oh, Bo-Ra Kim, et.al.// *Journal of Nanomaterials.*– 2012.– Article ID 475430.
15. Motornov, M. Field-Directed Self-Assembly with Locking Nanoparticles/ M. Motornov, S. Z. Malynych, D. S. Pippalla// *Nano Lett.*– 2012.– V.12.– P. 3814–3820.
16. Bahns, T. Optically Directed Assembly of Continuous Mesoscale Filaments/ T. Bahns, S. K. R. S. Sankaranarayanan, S. K. Gray, et.al.// *Physical Review Letters.*– 2011.– V.106.– P. 095501.
17. Klajn, R. Light-controlled self-assembly of reversible and irreversible nanoparticle suprastructures/ R. Klajn, K. J. M. Bishop, B. A. Grzybowski// *PNAS.*– 2007.– V.104.– N.25.– P. 10305–10309.
18. *Semiconductor Nanocrystal Quantum Dots*/ ed. A. L. Rogach.– NewYork: SpringerWienNewYork, 2008.– 372 p.
19. Marcelo, A.-S. Dielectric Functions of Semiconductor Nanoparticles from the Optical Absorption Spectrum: The Case of CdSe and CdS/ A.-S. Marcelo, F. R. Di, G. Guido// *J. Phys. Chem.*– 2010.– V.114.– P. 3776-3780.
20. Карпов, С.В. Оптические и фотофизические свойства фрактально-структурированных золей металлов/ С.В. Карпов, В.В. Слабко.– Новосибирск: Издательство СО РАН, 2003.– 265с.
21. Lesnyak, V. Colloidal semiconductor nanocrystals: the aqueous approach/ V. Lesnyak, N. Gaponik and A. Eychmuller// *Chem. Soc. Rev.*– 2013. V.42.– P. 2905-2929.

Подписано в печать 03.03.2015. Печать плоская. Формат 60х84/16
Бумага офсетная. Усл. печ. л. 1,5. Тираж 100 экз. Заказ 676

Отпечатано полиграфическим центром
Библиотечно-издательского комплекса
Сибирского федерального университета
660041, г. Красноярск, пр. Свободный, 82а
Тел./факс: (391) 206-26-49; тел. (391) 206-26-67
E-mail: print_sfu@mail.ru; <http://lib.sfu-kras.ru>