

На правах рукописи

КИСЛОВ Денис Алексеевич

**МЕЖМОЛЕКУЛЯРНАЯ ТРАНСФОРМАЦИЯ  
ЭНЕРГИИ ЭЛЕКТРОННОГО ВОЗБУЖДЕНИЯ  
В НАНОРАЗМЕРНЫХ СИСТЕМАХ**

Специальность: 01.04.05 – Оптика

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени кандидата  
физико-математических наук

Оренбург 2011

Работа выполнена на кафедре радиофизики и электроники физического факультета Оренбургского государственного университета

**Научный руководитель:** доктор физико-математических наук, профессор Кучеренко Михаил Геннадьевич,

**Официальные оппоненты:** доктор физико-математических наук, профессор Салецкий Александр Михайлович (Физический факультет МГУ имени М.В.Ломоносова, г. Москва)

кандидат физико-математических наук  
Шахвердов Теймур Азимович  
(СПбГУ ИТМО, г. Санкт-Петербург)

**Ведущая организация:** Саратовский государственный университет имени Н.Г.Чернышевского

Защита состоится «14» декабря 2011 г. в 16-30 часов на заседании совета по защите докторских и кандидатских диссертаций Д 501.001.45. при Московском государственном университете имени М.В. Ломоносова по адресу: 119991, г. Москва, Ленинские горы, дом 1, стр.5 (19 корпус НИИ ядерной физики имени Д.В.Скобельцына МГУ имени М.В.Ломоносова), аудитория 2-15.

С диссертацией можно ознакомиться в научной библиотеке НИИ ядерной физики имени Д.В. Скобельцына МГУ имени М.В. Ломоносова.

Автореферат разослан « 9 » ноября 2011 г.

Ученый секретарь  
совета по защите докторских и  
кандидатских диссертаций Д 501.001.45  
кандидат физико-математических наук

Вохник О.М.

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

### Актуальность исследований

Явление межмолекулярного переноса энергии электронного возбуждения лежит в основе многих важных физических и фотохимических процессов, от фотосинтеза до флуоресцентного зондирования биологических систем. Он также интересен в нанофотонике, где эффективный перенос оптического возбуждения на расстояниях меньших длины волны является ключевым процессом.

Наряду с традиционными, ставшими уже классическими методами микроскопии, огромный интерес вызывают сегодня новые методы зондирования структуры наносистем – это ближнепольная FRET (Fluorescence Resonance Energy Transfer)-микроскопия. Эта технология является новейшим применением для явления межмолекулярного переноса энергии. Однако, тот факт, что ферстеровский перенос осуществляется на очень малых расстояниях (от 2 до 10 нм) между молекулами является одновременно и достоинством и недостатком данной технологии. Проблемой является не только повышение разрешения ближнепольной оптической микроскопии, но и формирование изображений анализируемых нанообъектов на основе сигналов достаточно высокой интенсивности. Большая часть данной диссертационной работы посвящена разработке методов, благодаря которым повышенное пространственное разрешение и улучшенное изображения FRET-микроскопа предлагается получать, подвергнув исходные сигналы усилению за счет плазмонного резонанса в специально сформированных металлических наноструктурах.

В последнее время происходит бурное развитие нанотехнологий. Создаются и изучаются различные наноструктурированные объекты и материалы с уникальными свойствами. На основе этих объектов разрабатываются принципиально новые технологии и устройства. Однако прежде чем применять новые технологии на практике, необходимо сначала исследовать фундаментальные процессы, происходящие в таких наноразмерных системах. Системы с характерными размерами, лежащими в нанометровой области, проявляют особую специфику, которая не обнаруживается у большинства макросистем. Соответственно такие системы, состоящие из относительно небольшого числа молекул или атомов, требуют отдельного подхода в своем описании. Значимость данных исследований заключается в том, что они подготавливают научную базу для создания элементов нано- и молекулярной электроники в будущем.

Цель работы заключалась в установлении закономерностей межмолекулярной трансформации энергии электронного возбуждения в наноразмерных системах различного типа: нанопористых адсорбентах, коллоидных полимерных растворах, молекулярных нанокомпозитах содержащих металлические нанокластеры, молекулярных системах включающих пленки нанометровой толщины.

Для достижения этой цели были поставлены следующие задачи:

1. Произвести обобщение математической модели безызлучательного переноса энергии электронного возбуждения между молекулами на случай их размещения вблизи плоской проводящей поверхности.
2. В рамках специально разработанной модели исследовать времяразрешенные сигналы свечения молекул донора и молекул акцептора, а также стационарные спектры флуоресценции донор-акцепторных пар при переносе энергии в присутствии плоской металлической поверхности.
3. Провести эксперименты по наблюдению безызлучательного триплет-синглетного переноса энергии электронного возбуждения в твердой полимерной матрице вблизи серебряной пленки нанометровой толщины.
4. Исследовать свойства математической модели, учитывающей влияние плазмонных свойств металлических сферических наночастиц благородных металлов на межмолекулярный индуктивно-резонансный перенос энергии электронного возбуждения.
5. Произвести учет вырожденности электронного газа в металлической наночастице при исследовании безызлучательного переноса энергии электронного возбуждения между молекулами, размещенными вблизи такой наночастицы.
6. Исследовать особенности диффузионно-контролируемого безызлучательного переноса энергии по обменному механизму между малыми молекулярными ионами в растворах полиэлектролитов.
7. Разработать математическую модель, которая будет учитывать влияние поля точечного молекулярного иона и диполя на кинетику диффузионно-контролируемых фото процессов вблизи сферической наночастицы и внутри нанополости.
8. На примере специально созданной модели произвести исследование особенностей протекания процесса термодиффузии кислорода в материале со сферическими нанопорами и растворе, содержащем полимерные глобулы и установить их влияние на кинетику фотореакций с молекулярными центрами.

#### **Научная новизна работы**

1. Экспериментально исследован безызлучательный триплет-синглетный перенос энергии электронного возбуждения в твердой полимерной матрице вблизи серебряной пленки нанометровой толщины. Данные эксперимента качественно согласуются с предлагаемыми математическими моделями.
2. Построена математическая модель, учитывающая влияние плазмонных свойств металлических плоских поверхностей и сферических наночастиц металлов на межмолекулярный индуктивно-резонансный перенос энергии электронного возбуждения.
3. Произведен учет поля точечного молекулярного иона и диполя в кинетике диффузионно-контролируемых фото процессов вблизи сферической наночастицы и внутри сферической нанополости.

4. Предложен метод управляемого локального концентрирования (или, наоборот, оттока) реагентов в наноструктурах и коллоидных системах за счет использования эффекта термодиффузии.

**Практическая значимость** работы заключается в следующем:

- Экспериментальные и теоретические результаты, полученные в данной работе, могут быть использованы для разработки технологии сканирующей ближнеполной микроскопии нанометрового разрешения, основанной на плазмонно-усиленном FRET-эффекте.
- Предлагается повышать уровень сигнала сканирующего ближнепольного микроскопа за счет использования плазмонной наноантенны определенной конфигурации.
- Предлагаемая в данной работе модель кинетики бимолекулярных реакций ионов и диполей в поле поляризующихся нанополостей и наночастиц более адекватно описывает реакции с участием заряженных частиц в рассматриваемых наноструктурированных системах. Установленные закономерности могут найти применение при разработке элементной базы молекулярной электроники.
- Предлагаемый метод управляемого локального концентрирования реагентов в наноструктурах и коллоидных системах может быть использован для обогащения реакционных зон (или, наоборот, обеднения) примесными молекулами.

**На защиту выносятся следующие положения:**

1. Безызлучательный перенос энергии электронного возбуждения, происходящий в молекулярной системе, расположенной вблизи плоской проводящей поверхности или сферической металлической наночастицы благодаря взаимодействию молекул с поверхностными плазмонами в металле может быть значительно ускорен или замедлен в зависимости от геометрических и спектральных условий.
2. Учет вырожденности электронного газа в металлическом нанокластере приводящий к трансформации свойств динамической поляризуемости металлической наночастицы, позволяет обнаружить существенные изменения в величине скорости безызлучательной передачи энергии.
3. При расчете кинетики бимолекулярных реакций ионов и диполей в поле поляризующихся нанополостей и наночастиц необходим учет в математических моделях электростатического взаимодействия, позволяющий избежать существенной ошибки в определяемой величине удельной скорости бимолекулярного реагирования.
4. В наноструктурированных системах термодиффузия приводит к локальному концентрированию молекул в зоне их реакции.

### **Апробация работы и публикации**

Основные результаты исследований опубликованы в 27 печатных работах, включающие в себя 7 изданий, рекомендованные ВАК для соискателей ученых степеней. Апробация работы проводилась на следующих конференциях: Четвертая международная конференция «Фундаментальные проблемы оптики» (Санкт-Петербург. 2006), Всероссийская научно-практическая конференция «Кадры XXI век» (Оренбург. 2007), Четвертая международная конференция молодых ученых и специалистов «Оптика-2007» (Санкт-Петербург. 2007), Тринадцатая всероссийская научная конференция студентов-физиков и молодых ученых «ВНКСФ-13» (Ростов-на Дону - Таганрог. 2007), ICONO/LAT (Минск. 2007), The second Russian-Japanese seminar «Molecular and Magneto Science» (Orenburg. OSU. 2007), Всероссийская научно-практическая конференция «Развитие университетского комплекса как фактор повышения инновационного и образовательного потенциала региона» (Оренбург. ОГУ. 2007), Всероссийская научно-практическая конференция «Интеграция науки и образования как условие повышения качества подготовки специалистов» (Оренбург. ОГУ. 2008), 51-ая международная научная конференция МФТИ (Москва. МФТИ. 2008), Всероссийская конференция «Многопрофильный университет как региональный центр образования и науки» (Оренбург. ОГУ, 2009), Международная конференция «Органическая фотоника» ICONO-RUSSIA (Санкт-Петербург. 2009), Международная конференция «Organic nanophotonics 2009 » (Оренбург. ОГУ. 2009), IV Российско-Японский семинар "Магнитные явления в физикохимии молекулярных систем" (Оренбург. ОГУ. 2009), 52-ая международная научная конференция МФТИ (Москва. МФТИ. 2009), Всероссийская научно-практическая конференция "Интеграция науки и практики в профессиональном развитии педагога" (Оренбург. ОГУ. 2010), Международная конференция «Органическая фотоника» ICONO-LAT (Казань. 2010), XII Международная конференция «Опто-, наноэлектроника, нанотехнологии и микросистемы» (Ульяновск. 2010), V Russian-Japanese Seminar “Molecular and Biophysical Magnetoscience” (Orenburg. OSU. 2010), Школа молодых ученых «Современные проблемы Нанoeлектроники, Нанотехнологий, микро- и Наносистем» (Ульяновск. 2010), XVIII Международная научная конференция студентов, аспирантов и молодых ученых «ЛОМОНОСОВ» (Москва. 2011), VII Международная конференция молодых ученых и специалистов «Оптика - 2011» (Санкт-Петербург. 2011), Всероссийская конференция "Фотоника органических и гибридных Наноструктур" (Черноголовка. 2011).

Получен диплом финалиста всероссийского конкурса инновационных проектов и идей научной молодежи (Москва. 2011).

Сделано сообщение по теме диссертации на научном семинаре кафедры общей физики физического факультета МГУ им. Ломоносова.

**Достоверность результатов.** Достоверность полученных научных результатов обеспечивается достаточным уровнем строгости разработанных математических моделей, использованием в экспериментах апробированных ме-

тодик измерения, высокоточной цифровой аппаратуры, компьютерных методов анализа и обработки экспериментальных данных, а также согласованностью результатов теоретического анализа с результатами экспериментальных исследований автора и других исследователей.

**Личный вклад.** Все результаты данной диссертационной работы получены автором лично или при его непосредственном участии.

**Участие в научных проектах.** Автор диссертации являлся одним из исполнителей следующих научных проектов, результаты которых частично вошли в материалы диссертации: «Селективная лазерная инжекция молекул кислорода в обогащенные реагентом полимерные глобулы жидких растворов и поры твердых наноструктур с люминесцентным мониторингом эффективности реакций в технологическом процессе» (РФФИ проект №06-08-00168-фоин\_а), «Исследование трансформации энергии электронного возбуждения в молекулярных системах, конденсированных на поверхности твердых диэлектриков» (Задание министерства образования и науки РФ №1.3.06), «Создание функциональных наносистем на основе ячеечных структур оксида алюминия, заполненных окрашенными макромолекулярными цепями с селективным фотооткликом» (РФФИ проект № 08-02-99035-р\_офи), «Разработка методов создания функциональных наноустройств для датчика - измерителя молекулярного кислорода с дистанционным мониторингом состояний по оптическому каналу» (Государственный контракт № 16.513.11.3015 в рамках ФЦП «Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технологического комплекса на 2007-2012 годы»), «Разработка методов формирования упорядоченных массивов наноструктур на основе оксида алюминия для люминесцентных сенсоров кислорода» (Государственный контракт № 16.513.11.3042 в рамках ФЦП «Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технологического комплекса на 2007-2012 годы»), «Разработка лазерной технологии локального концентрирования фотоактивированных реагентов в структурах функциональных наносистем» (РФФИ проект № 10-02-96021-р\_урал\_а).

**Структура и объем работы.** Работа состоит из введения, пяти глав, заключения и списка цитируемой литературы. Диссертация содержит 225 страниц текста, включая 228 рисунков и 6 таблиц. Список литературы включает 288 наименований.

## **КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ**

**Во введении** обосновывается актуальность исследований, показывается новизна работы, ее практическая и научная значимость, ставятся цели и задачи исследования и определяются выносимые на защиту положения.

**В первой главе** приводится краткий литературный обзор применения в современных областях науки сканирующей ближнепольной микроскопии. Опи-

саны основные методики измерений и изучаемые с помощью данного вида микроскопии объекты. Особое внимание уделено технологии сканирующей FRET (Fluorescence Resonance Energy Transfer)-микроскопии. Также в данном обзоре подробно рассмотрены работы, в которых сообщается о влиянии поверхностных и локализованных плазмонов в металле на межмолекулярный безызлучательный перенос энергии электронного возбуждения (FRET) протекающего по индуктивно-резонансному механизму.

Во второй главе описаны структурные формулы используемых в работе веществ, методы приготовления изучаемых образцов и экспериментальные методы исследования. На рисунке 1 представлена схема экспериментальной установки

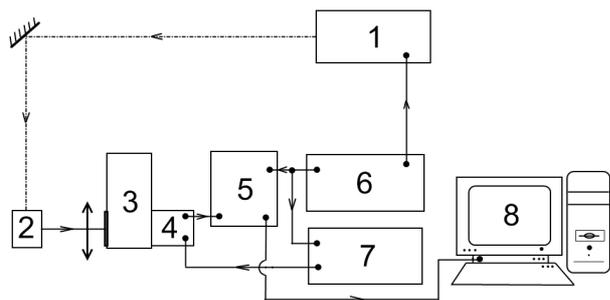


Рис. 1. Блок-схема кинетической установки. 1 – импульсный лазер LQ-529В; 2 – вакуумируемая ячейка с образцом; 3 – монохроматор МДР-206; 4 – фотоэлектронный умножитель ФЭУ-84; 5 - цифровой осциллограф GDS-840; 6 – импульсный генератор Г 5-56; 7 – импульсный высоковольтный генератор Г 5-15; 8 – персональный компьютер.

по наблюдению кинетических люминесцентных сигналов молекул органических красителей и молекул ароматических углеводородов внедренных в различные наноструктуры. Исследуемый образец помещался в вакуумируемую ячейку и подвергался облучению импульсами твердотельного лазера LQ-529В на иттрий-алюминиевом гранате активированном ионами неодима (IAG:Nd3. Продолжительность импульса составляла 10 нс. Спектральная селекция люминесцентного сигнала осуществлялась монохроматором МДР-206. Регистрация

времяразрешенных сигналов замедленной флуоресценции (ЗФ) и фосфоресценции производилась с помощью ФЭУ-84, электрические импульсы от ко-

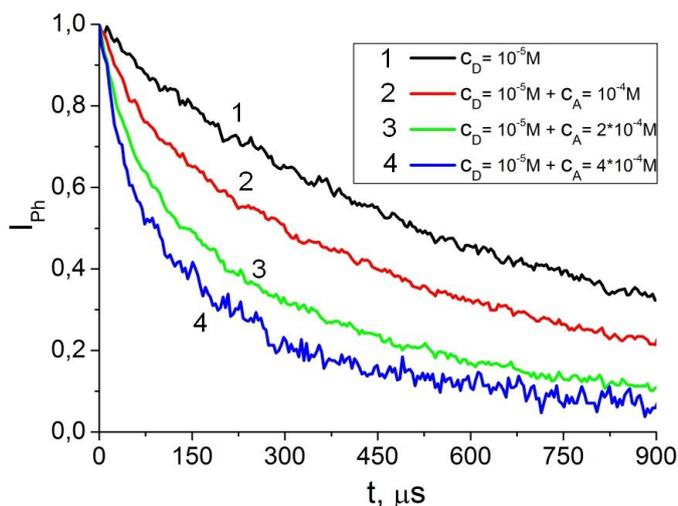


Рис. 2. Кинетика фосфоресценции *эритрозина* (донора) в присутствии *метиленового голубого* (акцептора) и без него при различных концентрациях акцептора.

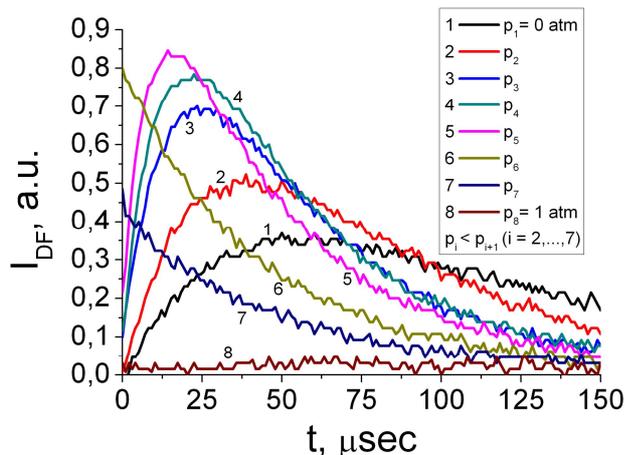


Рис 3. Кинетика замедленной флуоресценции эозина (в воде), адсорбированного анодированной поверхностью алюминия.  $C(\text{эозина}) = 10^{-4}$  моль/л,  $j = 1 \text{ A}/\text{дм}^2$  – плотность тока анодирования.

того, после произведенного по 32 кривым усреднения, передавались через цифровой осциллограф на персональный компьютер для дальнейшей обработки. На рисунке 2 представлена кинетика фосфоресценции *эритрозина* в присутствии *метиленового голубого* и без него при различных концентрациях акцептора. Изменения в кинетике фосфоресценции донора связано с процессом триплет-синглетного безызлучательного переноса энергии электронного возбуждения. На рисунке 3 представлены кинетики сигналов замедленной флуоресценции молекул эозина адсорбированного анодированной поверхностью алюминия при различных концентрациях кислорода в системе.

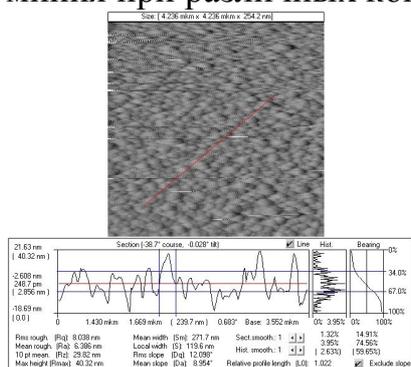


Рис. 4. АСМ-изображение поверхности серебряной пленки толщиной ~30 нм на стекле.

Рис. 4. АСМ-изображение поверхности серебряной пленки толщиной ~30 нм на стекле.

Кроме этого, в данной главе описаны: методика приготовления тонких окрашенных полимерных пленок, приготовление коллоидных растворов серебряных и медных наночастиц методами химического восстановления и лазерной абляции, методика формирования островковых пленок серебра на стеклянных подложках (см. рис. 4), технология получения пористых анодных оксидных слоев на поверхности алюминиевого сплава, а также приведены методы численной реализации математических моделей кинетики диффузионно-контролируемого переноса энергии основанных на уравнении Смолуховского-Фоккера-Планка.

В третьей главе детально исследован безызлучательный перенос энергии электронного возбуждения между молекулами, размещенными вблизи плоской проводящей поверхности (см. рис. 5). При этом влияние поля плоской поверхности полуограниченной среды на процесс переноса энергии происходит за счет дополнительного, опосредованного через проводник, диполь-дипольного взаимодействия молекул.

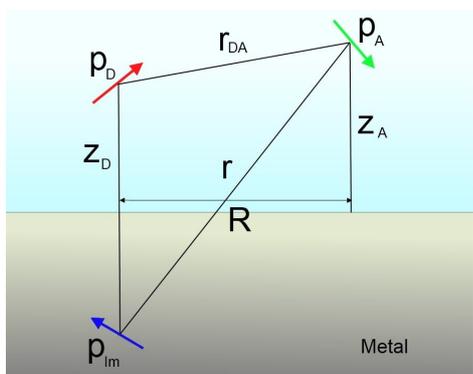


Рис. 5. Пространственная конфигурация молекулярных диполей донора  $p_D$ , акцептора  $p_A$  и диполя-изображения  $p_{Im}$  вблизи граничной поверхности проводника

ка.

Как и в случае обычной теории Фёрстера, выражение для скорости переноса (1), может быть приведено к виду, содержащему лишь экспериментально измеряемые спектральные характеристики. В данном выражении  $F_D(\omega)$  -

экспериментально регистрируемый спектральный контур люминесценции донора,  $\mu_A(\omega)$ - показатель поглощения акцептора,  $\varepsilon_1$  - диэлектрическая проницаемость среды над проводником, вычисляемая на частоте перехода донора,  $\varepsilon_2(\omega)$  - диэлектрическая проницаемость металла также вычисляется на частоте  $\omega$  электронного перехода в молекуле донора,  $c, \tau_D, n_A$  - скорость света в вакууме, время жизни возбужденного состояния донора и концентрация акцептора, соответственно.

$$\begin{aligned}
 U(z_D, z_A, R, \Omega_{DA}) = & \frac{9c^4}{8\pi n_A \tau_D} \frac{\chi^2(\Omega_{DA})}{[(z_D - z_A)^2 + R^2]^3} \int F_D(\omega) \mu_A(\omega) \frac{d\omega}{\omega^4} + \\
 & + \frac{9c^4}{8\pi n_A \tau_D} \frac{\chi^2(\Omega_{ImA})}{[(z_D + z_A)^2 + R^2]^3} \times \\
 & \times \int \left[ \left| \frac{\varepsilon_1 - \varepsilon_2(\omega)}{\varepsilon_1 + \varepsilon_2(\omega)} \right|^2 + 2 \operatorname{Re} \left[ \frac{\varepsilon_1 - \varepsilon_2(\omega)}{\varepsilon_1 + \varepsilon_2(\omega)} \right] \frac{\chi(\Omega_{DA})}{\chi(\Omega_{ImA})} \left( \frac{(z_D + z_A)^2 + R^2}{(z_D - z_A)^2 + R^2} \right)^{3/2} \right] F_D(\omega) \mu_A(\omega) \frac{d\omega}{\omega^4}.
 \end{aligned} \tag{1}$$

Первое слагаемое в правой части (1) представляет собой стандартное выражение для скорости переноса в теории Фёрстера. Влияние проводника на процесс определяет второе – интегральное слагаемое.

Второй интеграл в (1) содержит плазмонно-резонансный фактор  $\alpha(\omega)$  (2).

$$\alpha(\omega) = y_1(\omega) + y_2(\omega) \left( \frac{(z_D + z_A)^2 + R^2}{(z_D - z_A)^2 + R^2} \right)^{3/2}, \tag{2}$$

$$y_1(\omega) = \left| \frac{\varepsilon_1 - \varepsilon_2(\omega)}{\varepsilon_1 + \varepsilon_2(\omega)} \right|^2, \quad y_2(\omega) = 2 \operatorname{Re} \left[ \frac{\varepsilon_1 - \varepsilon_2(\omega)}{\varepsilon_1 + \varepsilon_2(\omega)} \right].$$

Очень часто функцию  $\varepsilon_2(\omega)$  записывают, используя модель свободных электронов Друде-Зоммерфельда:

$$\varepsilon(\omega) = 1 - \frac{\omega_{pl}^2}{\omega^2 + i\omega\gamma}. \tag{3}$$

Здесь  $\omega_{pl} = \sqrt{4\pi N e^2 / m}$  - объемная плазменная частота ( $m, e$  – масса и заряд электрона,  $N$  – концентрация свободных электронов).

В данной работе при расчетах наряду с моделью Друде-Зоммерфельда была использована экспериментально измеренная частотная зависимость диэлектрической проницаемости металла  $\varepsilon_2(\omega)$  (см. рис. 6 и 7).

Численное моделирование производилось по следующей схеме. Над плоской металлической поверхностью располагались молекулы донора и акцептора. Расстояния от молекул до металлической поверхности  $z_D$  и  $z_A$  задавалось вручную и фиксировалось при расчетах. Далее с некоторым малым пространственным шагом молекулы разводились друг относительно друга вдоль поверхности металла, и рассчитывалась скорость безызлучательного переноса энергии

(1) при различных значениях межмолекулярного расстояния. Полученные значения скорости сравнивались для такой же конфигурации молекул, но уже без металла.

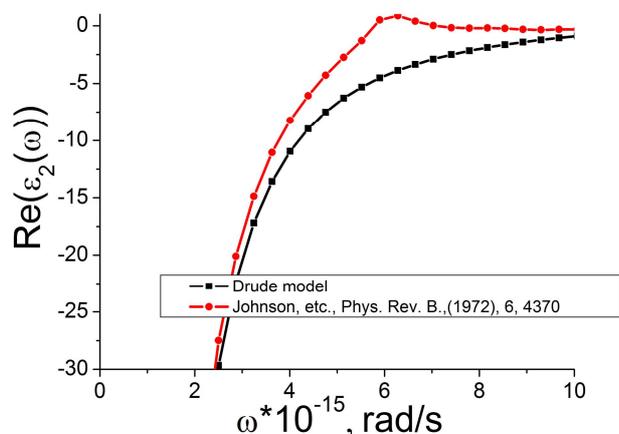


Рис. 6. Реальная часть диэлектрической проницаемости металла как функция частоты. Сравнение эксперимента с моделью Друде-Зоммерфельда для серебра ( $\omega_{pl}^{Ag} = 13,87 \cdot 10^{15}$  рад/с;  $\gamma = 1,57 \cdot 10^{14}$ , рад/с).

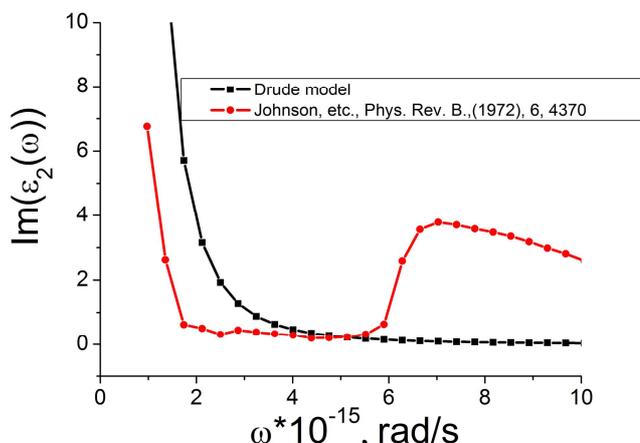


Рис. 7. Мнимая часть диэлектрической проницаемости металла как функция частоты. Сравнение эксперимента с моделью Друде-Зоммерфельда для серебра ( $\omega_{pl}^{Ag} = 13,87 \cdot 10^{15}$  рад/с;  $\gamma = 1,57 \cdot 10^{14}$ , рад/с).

На рисунках 8 и 9 представлены дистанционные зависимости скорости передачи энергии между парами молекул: **нафталином** и **антраценом**, а также **акридиновым желтым** и **родамином 6G** в присутствии металла и без него.

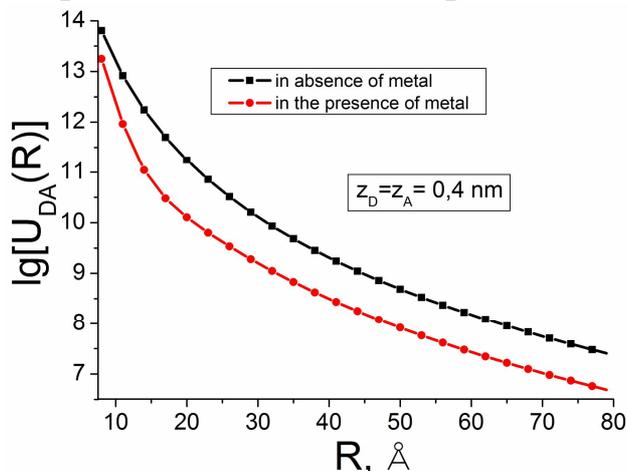


Рис. 8. Дистанционная зависимость скорости передачи энергии между **акридиновым желтым** и **родамином 6G** в присутствии металла и без него для **золота** при  $\epsilon_1 = 1$ .

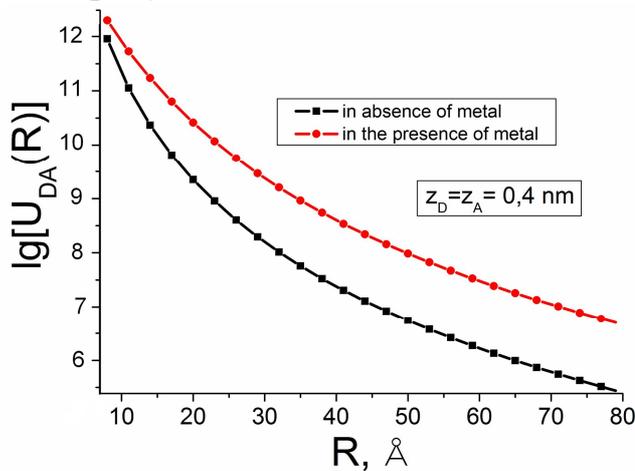


Рис. 9. Дистанционная зависимость скорости передачи энергии между **нафталином** и **антраценом** в присутствии металла и без него для **серебра** при  $\epsilon_1 = 1$ .

В случае, когда молекулы располагаются вблизи золотой подложки (см. рис. 8) при  $\epsilon_1 = 1$  процесс передачи энергии замедляется. Значение скорости переноса уменьшилось примерно в 10 раз по сравнению со случаем переноса без металла. Это происходит потому, что при таком значении диэлектрической проницаемости внешней среды функция  $\alpha(\omega)$  на всем диапазоне частот имеет

отрицательные значения, что в свою очередь делает отрицательным значение второго слагаемого в (1).

Если перенос энергии происходит в паре молекул нафталин-антрацен (см. рис. 9), то наблюдается максимальное значение интеграла перекрытия в области наложения спектральных полос эмиссии и абсорбции данной молекулярной системы с функцией спектрального отклика  $\alpha(\omega)$  для серебра. По этой причине перенос энергии в данной донор-акцепторной паре вблизи серебряной подложки будет протекать эффективнее. Значение скорости переноса увеличивается в 60 раз.

В результате расчетов установлено, что в случае, когда перенос энергии осуществляется над плоской поверхностью в зависимости от выбора металла подложки, донор-акцепторной пары молекул и подбора диэлектрических свойств окружающей среды можно добиться как замедления скорости переноса энергии на 1-3 порядка, так и увеличения скорости на 1-3 порядка.

Рассчитанная скорость безызлучательного переноса энергии в системе с металлической плоской поверхностью является ключевой характеристикой при описании данного процесса. Однако она не является экспериментально наблюдаемой величиной. Поэтому для удобства сравнения теоретической модели с экспериментальными данными были проведены дополнительные расчеты времязрешенных сигналов свечения молекул донора и молекул акцептора, а также стационарных спектров флуоресценции донорно-акцепторных пар. Предположим для упрощения расчетов, что все донорно-акцепторные пары молекул, в которых происходит безызлучательная передача энергии, расположены над плоской металлической поверхностью в тонком приповерхностном слое толщиной в одну молекулу.

Кинетические уравнения для числа возбужденных молекул донора  $n_D(t)$  и молекул акцептора  $n_A(t)$  имеют вид:

$$\frac{dn_D(t)}{dt} = -\frac{n_D(t)}{\tau_D} - \frac{dH(t)}{dt} \cdot n_D(t) \quad (4)$$

$$\frac{dn_A(t)}{dt} = -\frac{n_A(t)}{\tau_A} + \frac{dH(t)}{dt} \cdot n_D(t) \quad (5)$$

при начальных условиях  $n_D(0) = 1$  и  $n_A(0) = 0$ .

Где

$$\frac{dH(t)}{dt} = c_A \int_{r_0}^{\infty} [U_{DA}(R) \cdot \exp(-U_{DA}(R) \cdot t)] 2\pi R dR \quad (6)$$

Отсюда закон затухания числа доноров выражается формулой:

$$n_D(t) = n_0 \cdot \exp\left(-\frac{t}{\tau_D} - c_A \int_{r_0}^{\infty} [1 - \exp(-U_{DA}(R)t)] 2\pi R dR\right), \quad (7)$$

а кинетика люминесценции молекул акцептора выражается формулой:

$$n_A(t) = \exp\left(-\frac{t}{\tau_A}\right) \cdot \left[ \int_0^t n_0 \cdot \exp\left(\frac{t}{\tau_A}\right) \cdot \exp\left(-\frac{t}{\tau_D} - H(t)\right) \cdot \frac{dH}{dt} dt \right]. \quad (8)$$

Здесь  $\tau_D = 4$  нс - время жизни молекулы донора в возбужденном состоянии;  $\tau_A = 8$  нс - время жизни молекулы акцептора в возбужденном состоянии (причем  $\tau_D < \tau_A$ );  $c_A$  - поверхностная концентрация молекул акцептора (концентрация молекул в слое толщиной равной размеру молекулы).

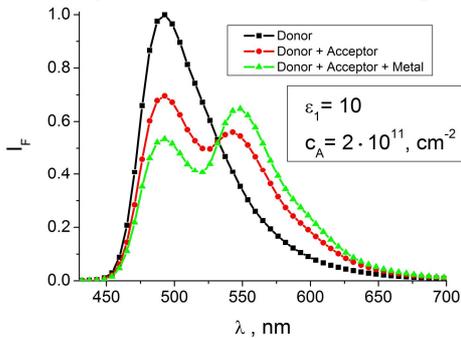


Рис. 10. Деформация спектра флуоресценции донор-акцепторных пар в приповерхностном слое при переносе энергии между акридиновым желтым и родамином 6G в присутствии металла. Для золота при  $\epsilon_1 = 10$  и  $c_A = 2 \cdot 10^{11} \text{ см}^{-2}$

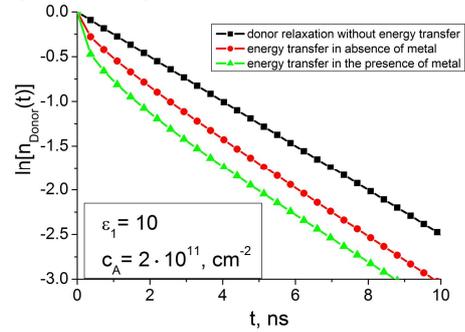


Рис. 11 Кинетика затухания числа донора в приповерхностном слое при переносе энергии между акридиновым желтым и родамином 6G в присутствии металла и без него для золота при  $\epsilon_1 = 10$  и  $c_A = 2 \cdot 10^{11} \text{ см}^{-2}$

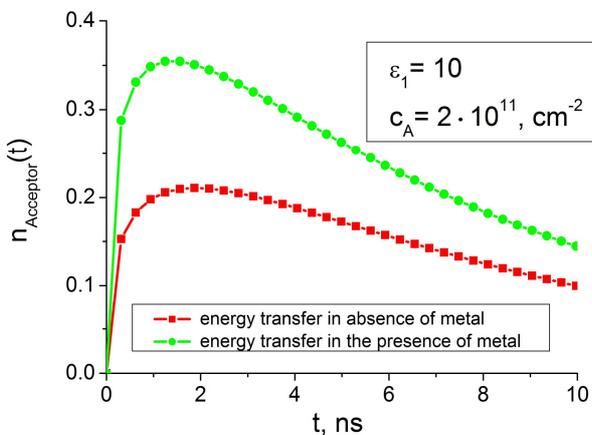


Рис. 12. Кинетика высвечивания акцепторов в приповерхностном слое при переносе энергии между акридиновым желтым и родамином 6G в присутствии металла и без него для золота при  $\epsilon_1 = 10$  и  $c_A = 2 \cdot 10^{11} \text{ см}^{-2}$

В данной главе также детально исследован безызлучательный перенос энергии электронного возбуждения между молекулами, размещенными вблизи металлической сферической наночастицы. Показано, что эффективным механизмом энергопередачи в рассматриваемой системе может быть механизм с участием локализованных поверхностных плазмонов. Произведенные сравнительные оценки эффективностей прямого диполь-дипольного и плазмонного каналов переноса энергии показывают доминирующий вклад плазмонного механизма в общую скорость энергопередачи при близком расположении молекул от поверхности металла и соответствующем выборе диэлектрических свойств окружающей среды (см. рис. 13). В присутствии наночастицы перенос энергии может быть эффективнее переноса без нее примерно в 30000 раз (т.е.  $U_{DA}/U_F \approx 30000$ ).

Выражение для полной скорости переноса энергии в присутствии металлической наночастицы:

$$U_{DA}(r_{DA}, r_D, r_A, \Omega_{DA}, \theta) = \frac{9c^4}{8\pi n_A \tau_D} \frac{\chi^2(\Omega_{DA})}{r_{DA}^6} \left( \frac{r_{DA} R}{r_D r_A} \right)^3 \int \tilde{\alpha}(\omega) F_D(\omega) \mu_A(\omega) \frac{d\omega}{\omega^4} + U_F(r_{DA}, \Omega_{DA}), \quad (9)$$

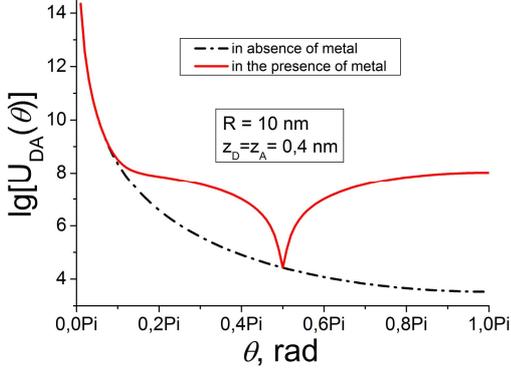


Рис. 13. Угловая зависимость скорости передачи энергии в присутствии серебряной наночастицы с радиусом 10 нм и без нее при  $\varepsilon_2 = 1$ . Для пары молекул нафталин-антрацен.

изменения величины скорости безызлучательной передачи энергии. Скорость переноса энергии с учетом вырожденности электронного газа в 25 раз меньше величины скорости в случае, когда вырожденность не учитывается (см. рис. 14).

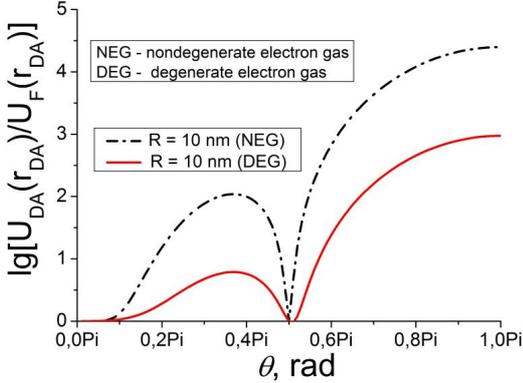


Рис. 14. Коэффициент усиления межмолекулярного переноса энергии в присутствии наночастиц серебра с учетом и без учета вырожденности электронного газа. NEG – невырожденный электронный газ, DEG – вырожденный электронный газ. При  $\varepsilon_2 = 1$ . Радиус наночастиц  $R = 10 \text{ нм}$ .

где введены обозначения:

$$\tilde{\alpha}(\omega) = y_1(\omega) \left( \frac{r_{DA} R}{r_D r_A} \right)^3 \frac{16 \cos^2 \theta}{\chi^2(\Omega_{DA})} + y_2(\omega) \frac{\cos \theta}{\chi(\Omega_{DA})};$$

$$y_1(\omega) = \left| \frac{\varepsilon_1(\omega) - \varepsilon_2}{\varepsilon_1(\omega) + 2\varepsilon_2} \right|^2, \quad y_2(\omega) = 2 \operatorname{Re} \left[ \frac{\varepsilon_1(\omega) - \varepsilon_2}{\varepsilon_1(\omega) + 2\varepsilon_2} \right] \quad (10)$$

$$U_F(R, \Omega_{DA}) = \frac{9c^4}{8\pi n_A \tau_D} \frac{\chi^2(\Omega_{DA})}{r_{DA}^6} \int F_D(\omega) \mu_A(\omega) \frac{d\omega}{\omega^4}.$$

Кроме этого, при расчете скорости переноса энергии был произведен учет вырожденности электронного газа в металлическом нанокластере, приводящий к трансформации динамической поляризуемости металлической наночастицы. Это приводит к существенным

изменениям величины скорости безызлучательной передачи энергии. Скорость переноса энергии с учетом вырожденности электронного газа в 25 раз меньше величины скорости в случае, когда вырожденность не учитывается (см. рис. 14). Наряду с теоретическими исследованиями был проведен ряд экспериментов по наблюдению безызлучательного триплет-синглетного переноса энергии электронного возбуждения в твердой полимерной матрице вблизи серебряной пленки нанометровой толщины. Наблюдаемое изменение кинетики фосфоресценции молекул донора (см. рис. 15) в системе с металлической пленкой обусловлено двумя процессами: тушением возбужденных состояний молекул металлом и плазмонным уменьшением эффективности процесса безызлучательного переноса энергии электронного возбуждения. Обнаружено, что эти процессы дают разный по величине вклад при использовании разных схем возбуждения образцов.

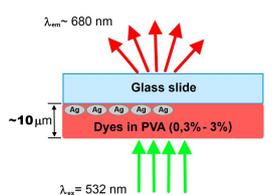


Схема возбуждения 1

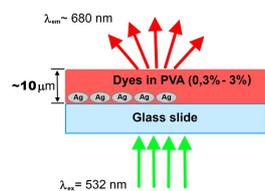


Схема возбуждения 2

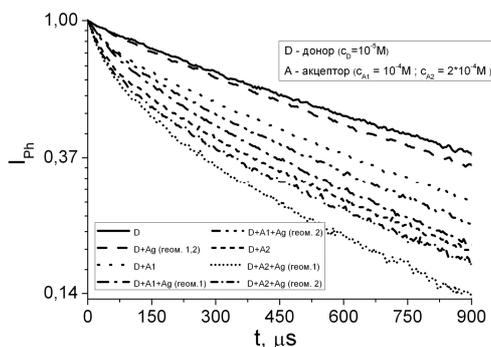


Рис. 15. Кинетика фосфоресценции эритрозина при различных концентрациях метиленового голубого и различной геометрии эксперимента в присутствии серебряной пленки и без нее.

Уменьшение эффективности процесса переноса энергии связано с интерференцией двух каналов по которым происходит перенос: прямого диполь-дипольного и плазмонного, обусловленного диполь-дипольным взаимодействием с металлом. Проведенный эксперимент качественно согласуется с математической моделью рассмотренной в данной главе.

В четвертой главе исследовано влияние самосогласованного электростатического поля на кинетику диффузионно-контролируемого переноса энергии электронного возбуждения в молекулярных наноструктурированных системах.

В частности были исследованы особенности диффузионно-контролируемого безызлучательного переноса энергии по обменному механизму между малыми молекулярными ионами в растворах полиэлектролитов. Рассматривался водно-солевой раствор ДНК с люминесцентным бимолекулярным зондом. В качестве бимолекулярного зонда использовалась пара из катионного (родамин 6G) и анионного (эритрозин) органических красителей. При активации системы электромагнитным излучением происходит перенос энергии электронного возбуждения от родамина 6G, который в рассматриваемой ситуации является донором энергии, к эритрозину – акцептору. На заряженную цепь молекулы ДНК из раствора будет «высаживаться» катионный краситель, молекулы-анионы цепью не адсорбируются, а находятся в растворе, сохраняя возможность лишь дистанционной передачи энергии между донором и акцептором.

Уравнение Смолуховского для времязависящего радиального распределения концентрации  $n_B(r, t)$  подвижных молекул (солевых ионов) в электростатическом поле  $U(r)$  с осевой симметрией

$$\frac{\partial}{\partial t} n_B(r, t) = D \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left[ r \left( \frac{\partial n_B}{\partial r} + \frac{1}{k_B T} \left( \frac{\partial U}{\partial r} \right) n_B(r, t) \right) \right]. \quad (11)$$

Начальное и граничные условия для плотности  $n_B(r, t)$  запишем в виде

$$\begin{aligned} n_B(r, 0) &= n_0 \exp[-U(r)/kT], \\ 2\pi aLD \left[ \frac{\partial n_B}{\partial r} + \frac{1}{kT} \left( \frac{\partial U}{\partial r} \right) n_B(r, t) \right]_{r=a} &= k_r n_B(R, t) \\ n_B(\infty, t) &= n_0 \exp[-U(r_\infty)/kT]. \end{aligned} \quad (12)$$

Постоянная  $k_r$  в (12) – «истинная» константа скорости реакции,  $D$  в (11) представляет собой коэффициент диффузии ионов-реагентов в растворе.

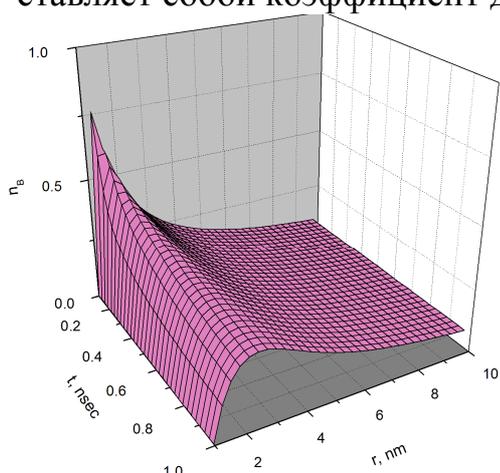


Рис. 16. Графики эволюции радиального распределения плотности молекулярных ионов в окрестности прямолинейного участка заряженной полимерной цепи для функции  $n_B(r, t)$ . Прямое численное интегрирование уравнения (11). Начальное условие  $n_B(r, 0) = n_0 \cdot \exp[-U(r)/kT]$ . При  $a = 2 \text{ nm}$ ,  $D = 10^{-9} \text{ m}^2/\text{sec}$ ,  $\beta=0.5$  ( $\beta^{-1} = k_B T$ ).

Удельная скорость реакции  $K(t)$  при постановке нулевого граничного условия отождествляется с диффузионным потоком на цилиндрическую поверхность радиуса  $a$

$$K(t) = 2\pi a L D \left[ \frac{\partial n_B}{\partial r} + \frac{1}{kT} \left( \frac{\partial U}{\partial r} \right) n_B(r, t) \right]_{r=a} =$$

$$= 2\pi a L D \exp \left[ -\frac{U(a)}{kT} \right] \left( \frac{\partial n}{\partial r} \right)_a \quad (13)$$

Скорость (13) бимолекулярной реакции (рис. 17, 18) на заряженной поверхности цилиндра нанометрового радиуса как функция времени  $t$  увеличивается от нуля до максимального своего значения  $K(t_m)$ , а затем уменьшается до нуля по закону  $K(t) \sim t^{-\beta}$ . Таким образом, при  $U_0 > 0$  реакция нестационарна при любых временах  $t$ .

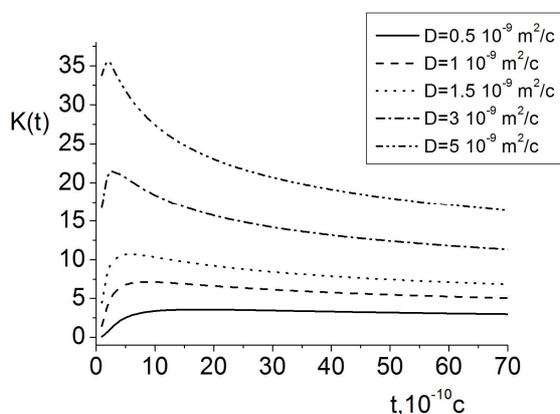


Рис. 17. Зависимость скорости  $K(t|D)$  бимолекулярного реагирования от коэффициента диффузии  $D$  малых молекул катионов.

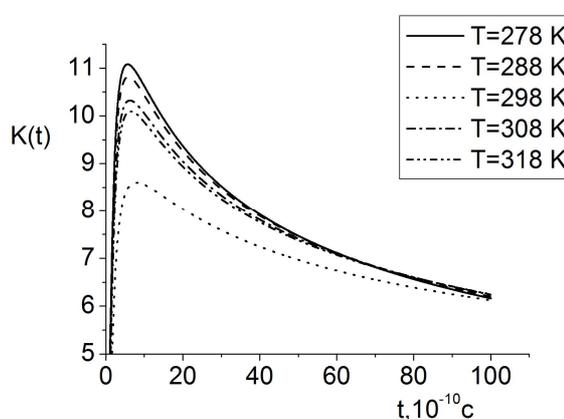


Рис 18. Зависимость скорости  $K(t) \sim t^{-\beta}$  бимолекулярного реагирования малых ионов от температуры раствора.

Кроме того в данной главе исследована кинетика диффузионно-контролируемых фотопроцессов в сферической нанопоре и вблизи сферической наночастицы, поверхности которых поляризованы точечным молекулярным ионом. Предложена математическая модель, которая учитывает влияние поля точечного молекулярного иона на кинетику диффузионно-контролируемых фотопроцессов вблизи сферической наночастицы и внутри нанополости. Учет та-

кого взаимодействия позволяет избежать существенной ошибки в определяемой величине удельной скорости бимолекулярного реагирования.

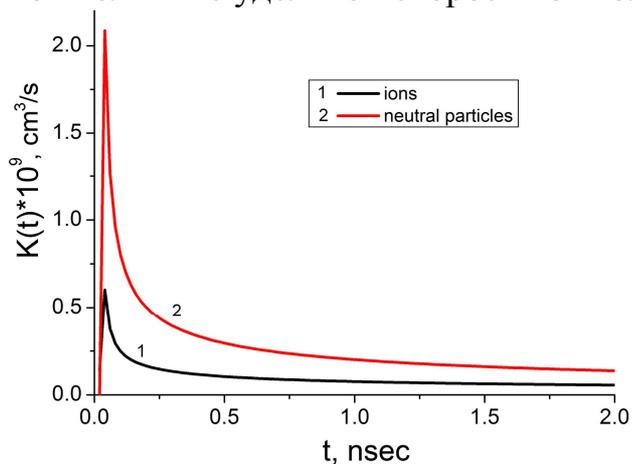


Рис. 19 Сравнение скорости  $K(t)$  бимолекулярного реагирования на поверхности сферической диэлектрической нанопоры (электростатическое отталкивание)  $r_0 = 10$  нм с учетом и без учета электростатического взаимодействия  $\epsilon_1 = 81$ ,  $\epsilon_2 = 10$  при:  $D = 10^{-6}$ ,  $\text{см}^2/\text{с}$ .

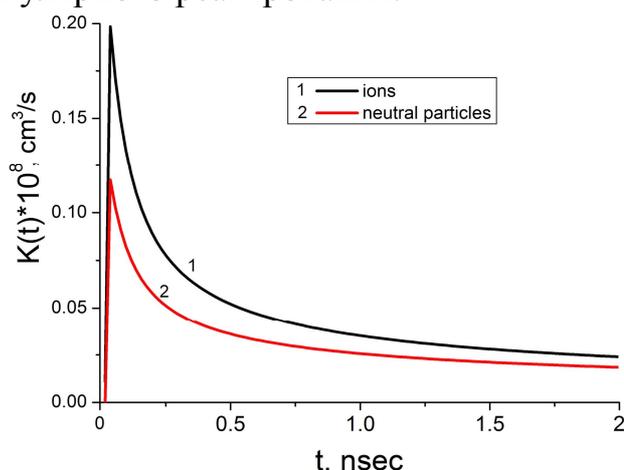


Рис. 20 Сравнение скорости  $K(t)$  бимолекулярного реагирования на поверхности сферической проводящей наночастицы  $r_0 = 10$  нм с учетом и без учета электростатического взаимодействия  $\epsilon_2 = 81$  при:  $D = 10^{-6}$ ,  $\text{см}^2/\text{с}$ .

Показано, что в зависимости от соотношения величин диэлектрических проницаемостей материала внешней среды и материала из которого изготовлена нанопора или наночастица сплошной среды вне нанопоры можно варьировать направление действующей на молекулярный ион электростатической силы. Можно получить либо электростатическое притяжение иона (см. рис. 20) к поверхности рассматриваемой наноструктуры, либо электростатическое отталкивание (см. рис. 19) от поверхности. Это в свою очередь существенно образом может сказаться на кинетике бимолекулярных реакций в таких системах.

**В пятой главе** проведены исследования особенностей протекания процесса термодиффузии кислорода в материале со сферическими нанопорами и растворе, содержащем полимерные глобулы. В рассматриваемые наноструктуры внедрены молекулы фотосенсибилизатора. Данная физическая система подвергается воздействию лазерного излучения. Молекулы фотосенсибилизатора поглощают электромагнитную энергию и, посредством безызлучательных переходов, переводят её в тепло, осуществляя, тем самым, локальный разогрев системы. Для создания в среде градиента температуры необходимо произвести неоднородный локальный разогрев. Разогрев среды при помощи лазерного излучения является очень удобным способом. К плюсам данного способа разогрева можно отнести малую по размерам разогреваемую область и то, что ввод энергии в систему осуществляется бесконтактным образом.

В системе с созданным градиентом температуры, возникает термодиффузионный поток, который приводит к перераспределению молекул кислорода в среде, т.е. появляется градиент концентрации. Эта пространственная неодно-

родность в концентрации молекул кислорода порождает в свою очередь фиковскую диффузию, приводящую к выравниванию концентраций.

Величина термодиффузионного потока значительным образом зависит от соотношения коэффициентов температуропроводности и диффузии. При  $a^2 \gg D$  (где  $a^2$  – коэффициент температуропроводности) релаксация теплового поля проходит значительно быстрее диффузионных процессов и термодиффузионный эффект незначителен. При обратном соотношении  $a^2 \ll D$  реализуется случай адиабатически медленного изменения теплового поля, под которое подстраивается быстрая диффузионная динамика. Таким образом, наиболее интересные и нетривиальные результаты будут в случае, когда  $a^2$  и  $D$  являются величинами одного порядка, что и имеет место для многих реальных систем.

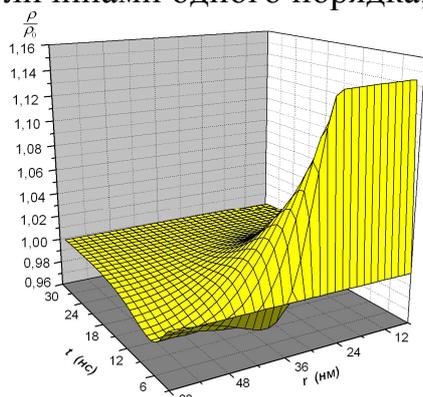


Рис. 21 Динамика функции плотности вероятности нахождения молекул кислорода в поре при  $T_0 = 77, K$ ;  $a_2^2 = 4 \cdot 10^{-8}, m^2/c$ ;  $D_2 = 4 \cdot 10^{-8}, m^2/c$ .

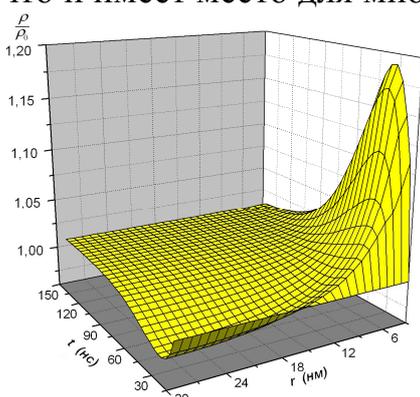
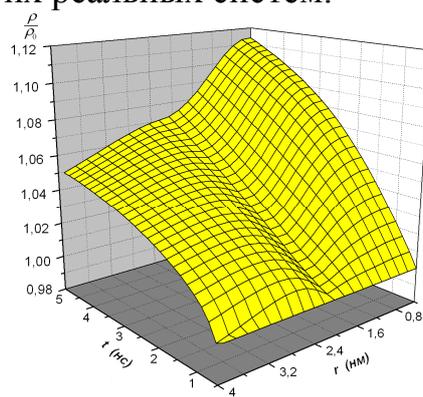


Рис. 22 Динамика функции плотности вероятности нахождения молекул кислорода в глобуле и прилегающей к ней области (слева) и увеличенная часть того же графика (справа) при  $T_0 = 77, K$  и  $a_1^2 = D_1 = 7,6 \cdot 10^{-11}, m^2/c$ ;  $a_2^2 = 4 \cdot 10^{-8}, m^2/c$ ;  $D_2 = 2,5 \cdot 10^{-7}, m^2/c$ .



Здесь  $a_1^2, D_1$  – коэффициент температуропроводности и коэффициент диффузии среды внутри поры / глобулы;  $a_2^2, D_2$  – коэффициент температуропроводности и коэффициент диффузии среды вне поры / глобулы.

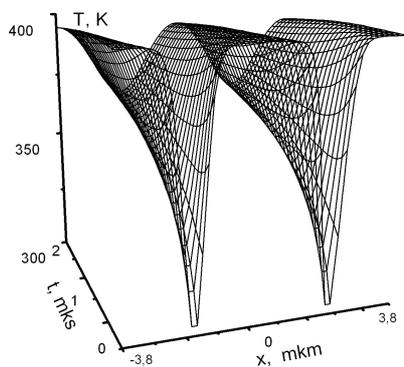
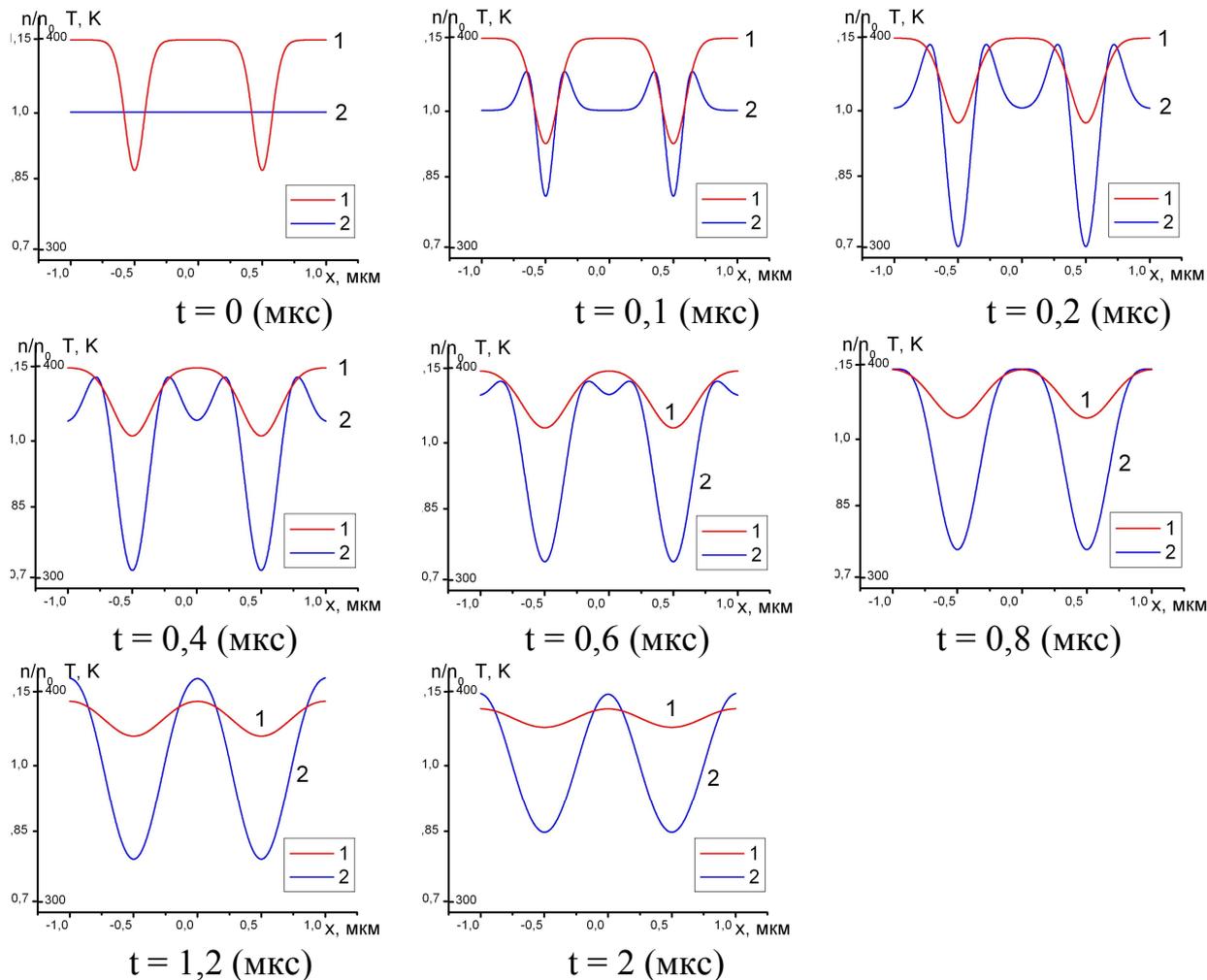


Рис. 23 Временная динамика несинусоидального теплового поля.

В результате исследования установлено проявление эффекта термодиффузии в кинетике фотореакций с молекулярными центрами. Показано, что в наноструктурированных системах термодиффузия приводит к локальному концентрированию молекул в зоне их реакции. Кроме этого в данной главе предложен метод управления параметрами стационарной фазовой голограммы при помощи термодиффузии молекул кислорода. Одним из интересных и нетривиальных полученных результатов является концентрационная решетка, записанная несинусоидальным тепловым полем (см. рис. 23).

Ниже на рисунках представлены профиль тепловой (1) и концентрационной (2) решетки в разные моменты времени  $t$ . Из расчетов видно, что специальным подбором профиля температурного поля, мы можем управлять параметрами решетки. В частности записывать решетки с половинным периодом, по сравнению с периодом поля накачки.



Рассматриваемые в данной главе вопросы, являются частью общей фундаментальной проблемы лазерной термохимии ультрадисперсных систем – управляемого локального концентрирования реагентов в нанореакторах. Предполагается, что именно в наноструктурах рассматриваемые эффекты будут больше по сравнению с изотропными средами.

## ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

1. Произведено обобщение математической модели безызлучательного переноса энергии электронного возбуждения между молекулами на случай их размещения вблизи плоской проводящей поверхности. Наличие металлической поверхности в системе значительно ускоряет или замедляет процесс переноса энергии в зависимости от геометрических и спектральных условий.
2. Методами компьютерного моделирования проведены исследования времяразрешенных сигналов свечения молекул донора и молекул акцептора, а также стационарных спектров флуоресценции донор-акцепторных пар при переносе энергии вблизи плоской металлической поверхности. Взаимодействие молекул с поверхностными плазмонами полуограниченной металлической среды приводит к существенным изменениям их времен жизни и значений квантовых выходов флуоресценции.
3. Экспериментально исследован безызлучательный триплет-синглетный перенос энергии электронного возбуждения в твердой полимерной матрице вблизи серебряной пленки нанометровой толщины. Наблюдается уменьшение эффективности процесса переноса энергии. Показано, что это связано с интерференцией двух каналов по которым происходит перенос: прямого диполь-дипольного и плазмонного, обусловленного диполь-дипольным взаимодействием с металлом.
4. Проведено исследование влияние плазмонных свойств металлических сферических наночастиц благородных металлов на межмолекулярный индуктивно-резонансный перенос энергии электронного возбуждения. Привнесение металлических наночастиц в молекулярную систему значительно ускоряет перенос энергии. Скорость переноса, при этом, увеличивается в 10-10000 раз.
5. Учет вырожденности электронного газа в металлическом нанокластере, приводящий к трансформации динамической поляризуемости металлической наночастицы, позволяет обнаружить существенные изменения в величине скорости безызлучательной передачи энергии. Скорость переноса энергии с учетом вырожденности электронного газа в 25 раз меньше величины скорости в случае, когда вырожденность не учитывается.
6. Исследованы особенности диффузионно-контролируемого безызлучательного переноса энергии по обменному механизму между малыми молекулярными ионами в растворах полиэлектролитов.
7. Предложена математическая модель, которая учитывает влияние поля точечного молекулярного иона и диполя на кинетику диффузионно-контролируемых фото процессов вблизи сферической наночастицы и внутри нанополости. Учет в математических моделях электростатического взаимодействия позволяет избежать существенной ошибки в определяемой величине удельной скорости бимолекулярного реагирования.
8. Проведены исследования особенностей протекания процесса термодиффузии кислорода в материале со сферическими нано порами и растворе, содержащем полимерные глобулы и установлены их проявления в кинетике фотореакций с молекулярными центрами. Показано, что в наноструктурированных системах термодиффузия приводит к локальному концентрированию молекул в зоне их реакции.

## ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

1. *Кучеренко М.Г., Русинов А.П., Чмерева Т.М., Игнатъев А.А., Кислов Д.А., Кручинин Н.Ю.* Кинетика фотореакций в регулярной пористой наноструктуре с цилиндрическими ячейками, заполненными активаторсодержащими макромолекулами // *Оптика и спектроскопия*, - 2009, - Т. 107, - № 3, - С. 505–510.
2. *Кучеренко М.Г., Кислов Д.А.* Кинетика диффузионно-контролируемого безызлучательного переноса энергии между малыми молекулярными ионами в растворах полиэлектролитов // *Вестник ОГУ*, - 2010, - Т. 107, - № 1 (107), - С. 122 – 130.
3. *Kucherenko M.G., Chmereva T.M., Kislov D.A.* Energy Transfer in Molecular Systems at the Surface of Metal Solids and Nanoparticles // *High Energy Chemistry*, - 2009, - Vol. 43, - № 7, - P. 587–591.
4. *Кучеренко М.Г., Чмерева Т.М., Кислов Д.А., Русинов А.П.* Учет термодиффузии кислорода в кинетике фотореакций с молекулярными центрами в приповерхностном слое // *Химическая физика и мезоскопия*, - 2010, - Т.12, - № 2. - С.232-242.
5. *Кучеренко М.Г., Чмерева Т.М., Кислов Д.А.* Увеличение скорости межмолекулярного безызлучательного переноса энергии электронного возбуждения вблизи плоской границы твердого тела // *Вестник ОГУ*. 2011. – Т. 120, -№ 1, - С. 170 – 181.
6. *Кислов Д.А., Кучеренко М.Г., Чмерева Т.М.* Ускоренный режим безызлучательно-го переноса энергии электронного возбуждения между молекулами вблизи проводящих тел // *Вестник ОГУ*. 2011. – Т. 123, -№ 4, - С. 128 – 135.
7. *Kuchereko M.G., Rusinov A.P., Kislov D.A.* Recording of holographic gratings by the thermodiffusion mechanism // *Proceedings SPIE*, - 2007, - Vol. 725, - P. 123-134.
8. *Русинов А.П., Кислов Д.А.* Управление параметрами голографических решеток в системе трехуровневых центров // *Труды четвертой международной конференции «Фундаментальные проблемы оптики» «ФПО – 2006»*. - Санкт-Петербург, 2006. – С. 125-127.
9. *Кучеренко М.Г., Русинов А.П., Игнатъев А.А., Кислов Д.А.* Моделирование термодиффузионных процессов в структурированных и однородных матрицах // *Материалы всероссийской научно-практической конференции «Развитие университетского комплекса как фактор повышения инновационного и образовательного потенциала региона», Секция 16.* – Оренбург, ИПК ГОУ ОГУ, 2007. – С. 60-66.
10. *Кислов Д.А.* Моделирование термодиффузии молекул кислорода в сферических наноячейках // *Труды тринадцатой всероссийской научной конференции студентов-физиков и молодых ученых «ВНКСФ-13»*, Ростов-на Дону – Таганрог, 2007, С 401-402.
11. *Kislov D.A., Rusinov A.P., Kucherenko M.G.* Recording of holographic gratings by the thermodiffusion mechanism // *Proceedings the second Russian-Japanese seminar "Molecular and Magneto Science"*, Orenburg: OSU, - 2007, - P. 46.
12. *Кислов Д.А., Кучеренко М.Г., Сизова М.С.* Кинетика бинарной реакции молекулярных ионов в поле линейного полииона // *Труды 51-ой научной конференции МФТИ «Современные проблемы фундаментальных и прикладных наук»*. – Москва, 2008. – С. 95-99.
13. *Кучеренко М.Г., Чмерева Т.М., Кислов Д.А.* Перенос энергии в молекулярных системах вблизи поверхностей диэлектриков и металлов // *Сборник тезисов международной конференции «Органическая нанофотоника (ICON-RUSSIA 2009)»*. – Санкт-Петербург, 2009. – С. 98
14. *Кучеренко М.Г., Чмерева Т.М., Кислов Д.А.* Перенос энергии в молекулярных системах вблизи поверхностей металлических тел и наночастиц // *Сборник трудов. Междуна-*

- родная конференция «Органическая фотоника» (ICON-RUSSIA 2009). - Санкт-Петербург, 2009. - С. 94-102.
15. *Чмерева Т.М., Кучеренко М.Г., Кислов Д.А.* Безызлучательный перенос энергии электронного возбуждения между молекулами вблизи металлических тел и наночастиц // Материалы международной конференции «Фотоника молекулярных наноструктур». Оренбург, ИПК ГОУ ОГУ. - 2009. С. 57-59.
  16. *Кислов Д.А., Кучеренко М.Г.* Кинетика реакций малых ионов в ДНК-полиэлектролитах // Материалы всероссийской научно-практической конференции «Многопрофильный университет как региональный центр образования и науки» Оренбург, ИПК ГОУ ОГУ, 2009. – С. 2256-2266..
  17. *Кислов Д.А., Кучеренко М.Г.* Кинетика фотопроцессов с участием молекулярных ионов в поле поляризующихся поверхностей и наночастиц // Материалы международной конференции «Фотоника молекулярных наноструктур». Оренбург, ИПК ГОУ ОГУ. - 2009. С. 63-65.
  18. *Kucherenko M.G, Kislov D.A.* Kinetics of diffusion-controlled radiationless energy transfer between small molecular ions in polyelectrolyte solutions // Proc. IV Russian-Japanese Seminar “Molecular and Biophysical Magnetoscience”, Orenburg: OSU, 2009. – P. 29.
  19. *Кислов Д.А., Кучеренко М.Г.* Кинетика бимолекулярных реакций молекулярных ионов в поле поляризующихся поверхностей и наночастиц // Труды 52-ой научной конференции МФТИ «Современные проблемы фундаментальных и прикладных наук. – Москва, 2009, - С. 166-169.
  20. *Кучеренко М.Г., Кислов Д.А.* Кинетика фотореакций с участием молекулярных ионов и диполей в поле поляризующихся границ полостей и наночастиц // Материалы всероссийской научно-практической конференции "Интеграция науки и практики в профессиональном развитии педагога". - Оренбург, ИПК ГОУ ОГУ, 2010. - С. 1410-1419.
  21. *Кучеренко М.Г., Кислов Д.А., Чмерева Т.М.* Ускоренный режим безызлучательного переноса энергии электронного возбуждения между молекулами вблизи проводящих поверхностей // Труды XII международной конференции «Опто-, наноэлектроника, нанотехнологии и микросистемы», Ульяновск, 2010, С. 92-93.
  22. *Kislov D.A., Kucherenko M.G.* Enhancement FRET Between Dye Molecules in the Presence of Spherical Metal Nanoparticle // Proc. V Russian-Japanese Seminar “Molecular and Biophysical Magnetoscience”, Orenburg: OSU, 2010. – P. 45-47.
  23. *Kislov D.A.* Enhancement FRET Between Dye Molecules Near Metal Flat Surface // Proc. V Russian-Japanese Seminar “Molecular and Biophysical Magnetoscience”, Orenburg: OSU, 2010. – P.24-26.
  24. *Kucherenko M.G, Kislov D.A., Chmereva T.M.* Plasmon Resonance Enhancement of FRET-SNOM Image // Proc. V Russian-Japanese Seminar “Molecular and Biophysical Magnetoscience”, Orenburg: OSU, 2010. – P. 18-20.
  25. *Кислов Д.А., Кучеренко М.Г., Чмерева Т.М.* Ускоренный режим безызлучательного переноса энергии электронного возбуждения между молекулами вблизи проводящих тел // Труды школы молодых ученых «Современные проблемы Наноэлектроники, Нанотехнологий, микро- и Наносистем», Ульяновск, 2010. – стр. 79 – 80.
  26. *Кислов Д.А., Роганов А.В.* Ускоренный режим триплет-синглетного безызлучательного переноса энергии электронного возбуждения между молекулами красителей в присутствии металлической наночастицы // Труды XVIII международной научной конференции студентов, аспирантов и молодых ученых «ЛОМОНОСОВ», Москва, 2011. – С. 31-33.
  27. *Кислов Д.А., Кучеренко М.Г.* Безызлучательный межмолекулярный триплет-синглетный перенос энергии в присутствии тонкой серебряной пленки // Труды всероссийской конференции "Фотоника органических и гибридных наноструктур". - Черногоровка, 2011. – С. 77.

Подписано в печать 7.11.2011 г.  
Формат 60x84 1/16.  
Усл. печ. листов 1,0. Тираж 130. Заказ 175.

ИП Востриков  
460018, г. Оренбург, ул. Рыбаковская, 100.  
Тел.: 25-33-60, 93-81-12.