

М.: Наука, 1984. – 222 с.

6. Гусев А.И. Нанокристаллические материалы: методы получения и свойства. - Екатеринбург: УрО РАН, 1998. - 199 с.

7. А.С 959928 СССР. Способ получения металлического порошка / Кабан А.П., Харитинич Н.Е.; опубл. 23.09.82, Бюл. № 35.

8. Пат. 2395369 РФ. Способ получения мелкодисперсных порошков / Лисенков А.А., Барченко В.Т.; опубл. 27.03.2010, Бюл. № 28.

9. Пат. 2055698 РФ. Способ получения ультрадисперсных порошков / Ильин А.П., Шнейдер В.Б.; опубл. 10.03.1996, Бюл. № 11.

ФОТОНИКА МОЛЕКУЛЯРНЫХ НАНОСТРУКТУРИРОВАННЫХ СРЕД

Ибраев Н.Х., д.ф.-м.н., профессор
директор Института молекулярной нанофотоники
Карагандинский государственный университет им. академика Е.А. Букетова
г. Караганда, Республика Казахстан

Представлены результаты исследований роли межмолекулярных взаимодействий, процессов переноса энергии и заряда на трансформацию световой энергии в наноструктурированных молекулярных средах.

Ключевые слова: фотоника, наноструктура, люминесценция, молекула, перенос энергии, наноплазмоника.

В настоящее время наблюдается мощное развитие нанонауки и нанотехнологий. Продвижение в область все меньших и меньших размерных масштабов связано с появлением новых, существенно важных, физических явлений, которые могут быть использованы в будущих нанотехнологических приложениях. В последние годы совместными усилиями химиков и физиков на основе органических и неорганических материалов созданы различные типы наномасштабных структур. Разработаны новые поколения приборов, которые позволяют изучать и создавать материалы и функциональные элементы атомарной точности.

Нарастающая тенденция развития нанонауки и нанотехнологий неизбежно требует изучения оптических явлений на нанометровой шкале. В пространственных структурах нанометрового размера возможно нетрадиционное протекание фотофизических процессов. Новые нанотехнологии манипулирования атомными и молекулярными системами должны учитывать физические свойства создаваемых систем.

В настоящей работе дан обзор работ по исследованию особенностей протекания фотофизических процессов в наноразмерном масштабе, проведенных в Институте молекулярной нанофотоники КарГУ им.Е.А. Букетова.

Объектом изучения являлись молекулярные кластеры, внедренные в наноразмерные поры матрицы неорганического стекла, анодированного оксида алюминия, широкопористого кремнезема, а также двумерные пленки Ленгмюра-Блоджетт на основе органических люминофоров, жирных кислот и амфифильных полимеров. Плазмонные эффекты изучались при добавлении в оптически активную среду наночастиц серебра.

Выбор в качестве объектов исследования органических материалов связан с возможностью и перспективностью использования отдельных органических молекул в качестве элементной базы микроэлектронных устройств. Для органических материалов (кристаллы, пленки, полимеры и др.) характерны слабые межмолекулярные взаимодействия, что дает возможность оптимально сочетать индивидуальные свойства отдельных молекул и коллективные свойства молекулярных ансамблей. Учитывая огромное разнообразие органических соединений и сравнительную простоту их синтеза, можно надеяться на создание на базе твердых органических веществ наноустройств с принципиально новыми возможностями.

Экспериментальные исследования проводились методами пико- и наносекундной лазерной кинетической спектроскопии, время-коррелированного счета фотонов, стационарной флуориметрии и абсорбционной спектроскопии. Квантовохимические расчеты молекул и моделирование структуры кластеров осуществлялись с помощью метода Паризера-Парра-Попла с учетом конфигурационных взаимодействий, методом частичного пренебрежения дифференциальным перекрытием (ЧПДП) со специальной спектроскопической параметризацией и методов молекулярной механики.

1. Исследование роли межмолекулярных взаимодействий при синтезе молекулярных нанопленок с заданными оптическими свойствами [1–18].

В тонких твердых пленках органические молекулы плотно упакованы. В результате этого все электронные процессы в таких структурах подвержены влиянию межмолекулярных сил. Фотопроцессы в этом случае протекают в супрамолекулярных системах – в ансамблях молекул и молекулярных агрегатах. Вопросы влияния межмолекулярных взаимодействий на формирование супрамолекулярных систем и их спектрально-люминесцентные свойства мало изучены. Результаты таких исследований могут быть использованы при создании наноструктурированных материалов с заданными оптическими свойствами.

В настоящей задаче исследована роль межмолекулярных сил при синтезе тонких молекулярных пленок и в формировании спектральных и люминесцентных свойств наноструктур на основе сложных органических молекул.

Технология Ленгмюра-Блоджетт (ЛБ) является весьма перспективным методом молекулярного конструирования. Данный метод позволяет создавать двумерные и многослойные системы и сверхрешетки на базе органических и биологических молекул и их сочетания. Практически, с использованием этой техники, можно целенаправленно, под контролем создавать наноразмерные органические и биоорганические системы на твердых подложках.

На основе проведенных исследований получены следующие основные результаты:

- разработана технология технологии получения наноразмерных твердых пленок ряда ксантеновых, родаминовых, оксазиновых, полиметиновых и полициклических ароматических люминофоров, используемых в оптических квантовых генераторах, светоизлучающих диодах, преобразователях солнечной энергии, в молекулярной электронике, в сенсорах. Показано, что электростатическое взаимодействие неамфифильных молекул красителей и макромолекул комплекса полиэлектролит-ПАВ способствует формированию органических наноструктурированных пленок. Спектрально-люминесцентные свойства формируемых наноструктур зависят от величины притяжения между ионами полиэлектролитного комплекса и полярными группами молекулы люминофора;

- исследования молекулярной агрегации в тонких пленках показали, что спектральные и люминесцентные свойства пленок зависят от природы мономерных и димерных центров и их геометрии на поверхности подложки. Структуру молекулярного агрегата можно селективно менять путем подбора частиц и условий получения твердых пленок;

- установлено, что форма и положение спектров поглощения и флуоресценции красителей в гибридных пленках ЛБ с полиамфолитом определяются наличием мономерных и димерных центров. Методами молекулярной механики и квантово-химического моделирования установлены закономерности объединения отдельных частиц в молекулярные агрегаты;

- установлено, что эксимерообразование в ЛБ пленках на основе полиметиновых красителей происходит в результате совместного действия дисперсионных и электростатических взаимодействий между молекулами красителей. Принудительная упаковка молекул красителя в ЛБ пленках способствует образованию димеров типа «сэндвич», из которых, за счет сильного электростатического притяжения, образуются эксимерные центры свечения;

- взаимодействие хромофоров в химических димерах приводит к расщеплению S_1 электронного уровня материнского красителя на два подуровня. Величина расщепления обусловлена не только диполь-дипольным (экситонным) взаимодействием хромофоров, как у физических димеров, но и резонансным взаимодействием, которое зависит от степени сопряжения хромофоров.

Проведенные исследования показали, что структуру супрамолекулярных образований можно селективно менять путем подбора частиц и условий получения твердых пленок. Это открывает новые возможности для изготовления наноструктурированных материалов с заданными физико-химическими свойствами.

Информация об оптических характеристиках исследованных красителей других классов может быть использована при получении сложных оптических нанопленок для модуляции оптического излучения, высокоэффективных люминесцентных источников света, наносенсоров, функциональных элементов для информационных технологий и устройств преобразования солнечного света.

Разработанные методики получения твердых люминесцирующих пленок не имеют аналогов и имеют практическое применение при получении тонкопленочных светоизлучающих наноструктур, которые используются в лазерной технике и молекулярной электронике.

2. Динамика электронных возбуждений в системах с ограниченной геометрией [19–29].

В настоящее время в связи с развитием нанотехнологии обострился интерес к экситонным процессам в наноразмерных системах. Результаты таких исследований важны как для понимания особенностей фундаментальных явлений в наноструктурах, так и их использования в нанотехнологиях.

Реакция спин-селективной аннигиляции триплетных возбуждений, протекающая по обменно-резонансному механизму, является одним из основных процессов распада возбужденных электронных триплетных состояний в конденсированных средах. Во многих случаях она определяет время жизни возбужденного состояния, его реакционную способность, влияет на вероятность внутрицентровых излучательных и безызлучательных переходов и процессов переноса энергии и заряда. Эффективность триплет-триплетной аннигиляции (ТТА) определяется как скоростью образования триплетных пар, так спин-спиновым взаимодействием в триплетных парах. С учетом того, что ТТА осуществляется на расстояниях $\sim 0,1-1$ нм между реагентами она может быть использована в качестве чувствительного инструмента для зондирования особенностей строения нанокластеров и специфики контактирования партнеров по реакции в дисперсных системах нанометрового масштаба. Этот процесс играет важную роль в трансформации электрической энергии в световую в органических светодиодах и в трансформации световой энергии в электрическую в органических солнечных ячейках. Наномасштабный диапазон действия дает уникальную возможность зондировать надмолекулярную структуру важных материалов для органической электроники, оптоэлектроники и фотовольтаики.

Особенности случайных блужданий электронно-возбужденных молекул или экситонов, их взаимодействие в однородных конденсированных средах достаточно подробно изучены как теоретически, так и экспериментально. Менее изученной является ситуация, когда электронные возбуждения, участвующие в процессе обмена энергией и электроном, созданы в наноразмерных системах с ограниченной геометрией (*restricted geometry*). К таким системам относятся пористые стекла, цеолиты, коллоидные растворы, мицеллы, пленки Ленгмюра-Блоджетт, наночастицы. Общим для них является то, что объем пространства, в котором протекает реакция, сопоставим с размерами реагентов. Каждый микрореактор включает лишь ограниченное число реагентов. Кинетика бимолекулярных химических реакций в системах с ограниченной геометрией не описывается классическими уравнениями формальной кинетики. Детальную информацию о специфике случайных блужданий и контактирования реагентов в наноразмерных порах можно получить, изучая модуляцию внешним магнитным полем константы скорости ТТА. Важным этапом спин-селективной парной аннигиляции триплетных экситонов является стадия пространственного расхождения не проаннигилировавших при первой встрече партнеров. За это время происходит изменение суммарного спинового состояния когерентной пары квазичастиц, на которое можно влиять внешним магнитным полем. При повторной встрече при обеспечении необходимой доли спинового компонента может реализоваться благоприятный исход реакции. Вероятность повторной встречи реагентов напрямую зависит от размерности системы, эффективности миграции и взаимодействия экситонов.

В результате проведенных исследований получены следующие основные результаты:

– в наноразмерных одномерных порах силикатных стекол, допированных органическими молекулами, формируются кластеры с упорядоченным и неупорядоченным распределением частиц. При фотовозбуждении кластеров с ростом размера пор в интервале от 2,5 до 11,1 нм наблюдается увеличение константы скорости аннигиляции триплетных экситонов. Вследствие неоднородного уширения электронных уровней энергии скорость миграции экситонов зависит от температуры матрицы. Временная зависимость модуляции константы скорости аннигиляции внешним магнитным полем обусловлена преобладанием аннигиляции триплетных экситонов в кристаллических кластерах или кластерах с хаотическим распределением молекул;

– исследована аннигиляция триплетных возбуждений в наноразмерных нитевидных порах на поверхности анодированного алюминия ($d \sim 20-50$ нм) и кремнезема ($d \sim 80-100$ нм). По влиянию температуры и магнитного поля на кинетику ТТА установлено, что молекулы органических соединений группируются в кластеры с квазикристаллической структурой и перколяционно связанные кластеры. Внутренняя локальная неоднородность структуры кластеров приводит к дисперсии триплетных уровней. Причем энергетический разброс T-уровней в перколяционном кластере значительно выше, чем в кристаллоподобном;

– в двумерных наноразмерных органических пленках основным каналом распада электронных триплетных состояний является ТТА, который происходит как внутрислойно, так и межслойно. В пленках существуют два типа кластеров с различной степенью локальной неоднородности. Миграция

экситонов в этих подструктурах осуществляется с различной энергией активации. Модуляция константы скорости ТТА внешним магнитным полем для мультислойных пленок показывает зависимости, характерные для кристаллов. Для монослоев наблюдается только отрицательный магнитный эффект. Временная зависимость магнитного эффекта в условиях высокой скорости миграции триплетного экситона связана с доминированием вклада в процесс ТТА кластеров с упорядоченным или хаотичным распределением молекул;

– исследованиями влияния молекулярного кислорода на люминесценцию органических молекул, внедренных в нанопоры силикатных стекол, анодированного алюминия и кремнезема установлено, что кинетика синглет-триплетной аннигиляции молекулярного кислорода и органических люминофоров определяется скоростью диффузии кислорода в нанопоры. Показано, что в ЛБ пленках доминирующий вклад в тушение триплетов люминофора молекулами O_2 вносит стадия фронтального вертикального воздействия потока молекул кислорода на молекулярный слой. В отличие от пористой поверхности тушение кислородом люминесценции ЛБ пленок красителей имеют линейные Штерн-Фольмеровские зависимости в диапазоне парциальных давлений кислорода от $0,2 \cdot 10^{-4}$ мм.рт.ст. до 0,6 мм.рт.ст.

Установленные закономерности спин-селективных фотопроцессов в наноструктурированных средах следует учитывать при создании научных основ наноэлектроники: органических светодиодов, элементов памяти, преобразователей световой энергии, оптических модуляторов, биосовместимых элементов молекулярной электроники.

Результаты температурной и магнитополевой зависимости скорости аннигиляции триплетов в системах пониженной размерности показывают возможность применения реакции ТТА для зондирования особенностей морфологических свойств и динамических характеристик дисперсных наноматериалов.

Результаты по влиянию молекулярного кислорода на возбужденные состояния органических люминофоров в органических наноструктурах могут быть использованы для модификации существующих люминесцентных сенсоров кислорода.

3. Межмолекулярный перенос энергии в органических наноструктурах [30–36].

В наноразмерных структурах, сравнимых с размерами молекул, кинетика транспорта энергии возбуждения будет отличаться от макроскопических однородных сред. В большей степени эти отличия должны проявиться в низкоразмерных системах, создающих энергетический и временной хаос в молекулярных ансамблях возбужденных молекул. Изучение динамики короткодействующих обменно-резонансных фотопроцессов в таких системах позволяет выявить многие особенности влияния размерности системы на эффективность межчастичного обмена электронной энергией.

В рамках данной проблемы проведены исследования процессов переноса энергии, протекающих по обменно-резонансному и индуктивно-резонансному механизмам в наноразмерных объектах.

В результате проведенных исследований получены следующие основные результаты:

– экспериментально и теоретически исследован триплет-триплетный перенос (Т–Т) энергии в мультислойных тонких пленках ароматических молекул и красителей. Выполнено квантово-химическое исследование особенностей формирования электронно-возбужденных состояний и фотопроцессов в системе «донор–акцептор». Нетипичная дистанционная зависимость эффективности Т–Т переноса энергии в мультислойных тонких пленках ароматических молекул и красителей обусловлена дополнительным тушением донорных частиц вследствие процесса передачи энергии акцепторным центрам по индуктивно-резонансному механизму;

– комплексно исследован синглет-синглетный перенос энергии электронного возбуждения между молекулами органических красителей в ЛБ пленках и нанопористых матрицах. Выполнен квантово-химический расчет формирования электронно-возбужденных состояний в донорно-акцепторной системе. Показано, что перенос энергии эффективно осуществляется на расстояниях менее 4 нм между молекулами донора и акцептора. Рассчитанные и экспериментально полученные константы скорости переноса энергии хорошо коррелируют между собой.

– в нанопористых матрицах наиболее эффективно перенос энергии осуществляется в порах с наименьшим радиусом. Увеличение размеров пор ведет к уменьшению константы тушения флуоресценции донора. Это связано с тем, что в стеклах с радиусом пор 1,8 нм молекулы донора и акцептора энергии располагаются на расстояниях, меньше критического радиуса переноса энергии R_0 . Благодаря этому, энергия, поглощенная молекулой донора, будет преимущественно передаваться молекуле акцептора, а не дезактивировать безызлучательно;

– индуктивно-резонансный перенос энергии между молекулами органических красителей увеличивает значения фотовольтаических параметров солнечных ячеек благодаря расширению

спектральной фоточувствительности ячейки в синей области спектра.

Полученные результаты важны для понимания механизмов транспорта световой энергии к реакционным центрам в биологических системах. Кроме того, исследования переноса энергии в искусственно организованных молекулярных ансамблях можно использовать при разработке научных основ технологии получения сложных оптических наноустройств для модуляции оптического излучения, высокоэффективных люминесцентных источников света, наносенсоров, функциональных элементов для информационных технологий, солнечных ячеек.

4. Роль спинового состояния в фотогенерации электрон-дырочных пар в полупроводниковых полимерных матрицах, допированных красителями [37–39].

Изучение фотофизических процессов и фотохимических реакций протекающих в полиметиновых красителях по-прежнему привлекает большое внимание из-за широкой области применения их в качестве зондов и маркеров в биологии и медицины, в качестве сенсibilизаторов в солнечных ячейках Гретцеля, в нелинейной оптике и лазерных технологиях, в качестве потенциальных сенсibilизаторов для фотодинамической терапии, а также в качестве органических полупроводников для получения сред обработки и записи информации.

В данной задаче изучен процесс образования и рекомбинации электронно-дырочных пар в полимерах, допированных полиметиновыми красителями. Показано, что в тонких полимерных пленках поли-N-эпоксипропилкарбазола, допированных катионным и нейтральным полиметиновыми красителями наблюдается рекомбинационная люминесценция, обусловленная образованием электронно-дырочных пар. Вследствие конкуренции между синглетным и триплетным каналами образования электронно-дырочных пар наблюдается временная зависимость влияния внешнего магнитного поля на интенсивность рекомбинационной люминесценции. Роль синглетного канала усиливается в присутствии внешнего тяжелого атома из-за увеличения скорости триплет-синглетных переходов в молекулах красителей. Наиболее эффективным для получения электронно-дырочных пар является использование катионного красителя.

Исследовано влияние размерного ограничения на процесс образования и рекомбинации электронно-дырочных пар. Уменьшение области миграции свободных носителей заряда в пористом стекле с $r=11,1$ нм приводит к отсутствию влияния магнитного поля на длительную люминесценцию в милли- и микросекундном диапазоне регистрации свечения.

Полученные результаты научных исследований развивают фундаментальные представления о спин-селективных процессах трансформации электронных возбуждений в органических наноструктурах, показывают необходимость создания новых моделей протекания спин селективных реакций в системах с ограниченной геометрией с учетом процессов релаксации. Результаты могут быть использованы для улучшения понимания синергетических процессов самосборки в наноструктурах. Полученные данные позволяют улучшить понимание спин-селективных процессов трансформации световой энергии в электрическую энергию, что может стать базой для создания органических солнечных ячеек нового типа. Оценка роли процессов генерации и рекомбинации носителей заряда в разном мультиплетном состоянии может позволить увеличить эффективность работы органических фотовольтаических и электролюминесцентных ячеек.

5. Плазмон усиленные активные элементы для перестраиваемых лазеров на красителях и фотовольтаических ячеек [40–42].

В настоящее время одной из бурно развивающихся областей нанонауки является *наноплазмоника*. Предметом наноплазмоники являются оптические свойства металлических частиц и наноструктур, которые обусловлены колебаниями электронов проводимости. Оптически активные материалы на основе плазмонных наночастиц и органических люминофоров представляют практический интерес для органической фотовольтаики, квантовой электроники, нелинейной оптики, флуоресцентной сенсорики.

В данном разделе приведены результаты исследования влияния локализованного плазмонного резонанса наночастиц серебра на свойства различных типов молекулярной люминесценции, вольт-амперные характеристики солнечных фотоэлементов. В результате проведенных исследований получены следующие основные результаты:

– исследовано влияние наночастиц серебра на спонтанную и вынужденную люминесценцию молекул родамина 6Ж в водных растворах. Установлено что, при лазерном фотовозбуждении раствора красителя появляется спонтанная флуоресценция, которая с ростом накачки преобразуется в вынужденное лазерное излучение и суперлюминесценцию. При добавлении наночастиц серебра в раствор родамина 6Ж наблюдается усиление всех видов люминесценции и уменьшение порога генерации (более чем в 10 раз) обоих видов вынужденного излучения. Зависимости интенсивности

лазерной генерации и суперлюминесценции от концентрации наночастиц серебра коррелируют с данными по спонтанной флуоресценции;

– исследованы спектральные и люминесцентные свойства красителя родамин 6Ж в пористой матрице анодного оксида алюминия. Пленки с высокоупорядоченной пористой структурой получены методом двухстадийного анодирования. Диаметр пор равен ~50 нм, а расстояние между соседними каналами составляет ~100 нм. При возбуждении образцов с концентрацией красителя $0,3 \cdot 10^{14}$ моль/м² второй гармоникой Nd:YAG лазера в продольном варианте с мощностью источника накачки 0,4 МВт/см² получена лазерная генерация. Присутствие наночастиц серебра в пористом оксиде алюминия приводит к понижению порога генерации вынужденного излучения красителя. Полученные результаты демонстрируют потенциальную возможность использования пористых пленок анодного оксида алюминия, допированных лазерными красителями, для создания активных элементов квантовой электроники;

– изучено влияние наночастиц серебра на вольт-амперные характеристики и фотопроводимость сенсibilизированных красителями солнечных ячеек. Установлено, что добавление наночастиц Ag в пленки TiO₂ приводит к росту тока короткого замыкания и уменьшению времени релаксации фотопроводимости.

Полученные результаты могут быть использованы в флуоресцентной аналитической спектроскопии, при разработке нанокompозитных материалов для активных элементов квантовой электроники и нелинейной оптики и органической фотовольтаики.

Литература:

1. Ibrayev N. Kh., Zhunusbekov A. M., Satybaldina D. Zh. Luminescence of Molecular Aggregates of Dyes in Langmuir–Blodgett Films // *Optics and Spectr.* – 1999. – Vol. 87, No. 2, – P. 298 – 300.
2. Ibrayev N. Kh., Satybaldina D. Zh., Kupriyanov N. K., Alekseeva V. I., Marinina L. E., Savvina L.P. Luminescent Properties and the Structure of Langmuir–Blodgett Films of Rhodamines // *Optics and Spectr.* – 1999. – Vol. 86, No. 3, – P. 383- 386.
3. Alekseeva V. I., Ibrayev N. Kh., Luk'yanets E. A., Marinina L. E., Savvina L. P., Satybaldina D. Zh. Langmuir–Blodgett Films on the Basis of Decyl Esters of Xanthane Dyes // *Rus. Jour. of Phys. Chem.A.* – 1999. – Vol. 73, No. 12, – P. 2004-2009.
4. Ibrayev N. Kh., Ishchenko A.A., Karamysheva R. Kh., Mushkalo I.L.. Influence of interaction of chromophores, linked by the unconjugated chain, on the luminescence properties of biscyanine dyes // *Journ. of Lumines.* – 2000. – V.90, – P.112-119.
5. Alekseeva V.I., Zikirina A. M., Ibrayev N. Kh., Marinina L.E., Savvina L.P. The Structure and Properties of Langmuir Films of Amphiphilic Nile Red // *Rus. Jour. of Phys. Chem.A.* – 2005. – V. 79, N 3, – P. 415-418.
6. Ibrayev N. Kh., Yeroshina S.A., Ischenko A.A., Mushkalo I. L. Investigation of Conformational and Electron Properties of Biscyanines Dyes // *Mol. Cryst. and Lig. Cryst.* – 2005. – V.427, – P. 139-147.
7. Alekseeva V.I., Marinina L.E., Savvina L. P., Ibrayev N. Kh., Zikirina A. M. Spectral and Luminescent Properties of Nile red Dye in Langmuir–Blodgett Films. // *Mol. Cryst. and Lig. Cryst.* – 2005. – V.427, – P.159-166.
8. Yeroshina S.A., Ibrayev N. Kh., Ishchenko A.A.. Investigation of photophysical processes in biscyanine dyes // *Atmos. Oceanic Opt.* – February–March 2006. – Vol. 19, No. 2–3, – P. 204-207.
9. Yeroshina S.A., Ibrayev N. Kh., Kudaibergenov S.E. Obtaining and properties of Langmuir–Blodgett films of amphiphilic polyampholite, activated by rhodamine dye // *Proceed. of SPIE.* – 2006. – Vol. 6263, – PP. OE-1 – OE-6.
10. Yeroshina S.A., Ibrayev N.Kh., Kudaibergenov S.E., Rullens F., Devillers M., Laschewsky A. Spectroscopic properties of mixed Langmuir–Blodgett films of rhodamine dyes and poly(N,N-diallyl-N-octadecylamine-alt-maleic acid // *Thin Solid Films.* – 2008. – V. 516, No 8, – P. 2109-2114.
11. Ibrayev N.Kh., Alekseeva V.I., Marinina L.E., Savvina L.P. The Effect of Chromophore-Chromophore Interaction on the Spectral Luminescent Properties of Oxazine Dye Dimers // *Rus. Jour. of Phys. Chem.A.* – 2008. – V.82, No 5, – P. 860-863.
12. Ibrayev N.Kh., Tenchurina A. R. The Aggregation of Rhodamine Dye Molecules in Mixed Langmuir–Blodgett Films // *Russian Journal of Physical Chemistry A.* – 2010. – Vol. 84, No. 3, – P. 521–524.
13. Seliverstova E.V., Ibrayev N.Kh., Kudaibergenov S.E. Fluorescing behavior of thin solid films based on polyelectrolyte-surfactant complex and dye molecules // *Jour. of Appl. Polym. Sci.* – 2013. – V. 129(1). – P. 289–295.
14. Seliverstova E.V., Ibrayev N.Kh., Kudaibergenov S.E. Preparation and properties of nanosized fluorescent solid films based on a polyelectrolyte-surfactant complex with organic dyes // *Rus. Jour. of Phys. Chem.A.* – 2013. – Vol. 87, No. 5. – P. 865-871.
15. Ibrayev N.Kh., Seliverstova E.V., Alekseeva V.I., Marinina L.E., Savvina L.P. Preparation and photophysical properties of thin films of coumarin dyes // *Rus. Jour. of Phys. Chem. A.* – 2013. – Vol. 87, No. 7. – P. 1234-1238/
16. Ibrayev N.Kh., Seliverstova E. V., Tenchurina A. R., Ishchenko A. A., Shargaeva A. Yu. Structure and Physicochemical Properties of Cation Polymethine Dyes in Langmuir–Blodgett Films // *Rus. Jour. of Phys. Chem. A.* – 2013. – Vol. 87, No. 12, pp. 2082–2088.

17. Ибраев Н.Х., Аймуханов А.К., Селиверстова Е.В. Способ получения люминесцирующих пленок. *Инновационный патент №0721.1 от 28.05.2009 г.*
18. Ибраев Н.Х., Селиверстова Е.В., Кудайбергенов С.Е. Способ получения люминесцирующих наноразмерных пленок. *Инновационный патент №28245 от 20.05.2013 г.*
19. Ibrayev N. Kh., Latonin V.A. Decay kinetics of the delayed annihilation fluo.res.of aromatic molecules in Langmuir-Blodgett films // *Phys.Solid State.* – 1999. – V. 41/4, – P.664-667.
20. Ibrayev N. Kh., Latonin V.A. Dynamic of triplet excitations in Langmuir-Blodgett films of aromatic molecules // *Journ. of Lumines.* – 2000. –V.87-89, –P.760-763.
21. Ibrayev N. Kh., Zhunusbekov A. M.. Kinetics of Long-lived Luminescence of Eosin in Langmuir-Blodgett Films // *Optics and Spectr.*– 2002. – Vol. 92, No. 2, –P. 178–180.
22. Ibrayev N. Kh. Effect of Temperature on Triplet Exciton Migration in Langmuir-Blodgett Films // *Optics and Spectr.*– 2002. – Vol. 93, No. 2, – P. 242-243.
23. Ibrayev N. Kh., Mahkanov K.M.. Temperature and magnetic field influence on annihilation de layed fluorecence of aromatic molecules in Langmuir-Blodgett films // *Mol. Cryst. and Liq. Cryst.* – 2002. – V. 384. P. 25-31.
24. Ibrayev N. Kh. Temperature and magnetic field influence on annihilation of triplet excitons in thin films of organic molecules // *Rep. of Nat. Acad. of Sci. Rep. of Kazakh.* – 2003. – No.2, – P.22-28.
25. Ibrayev N. Kh., Makhhanov K.M.. Migration of Triplet Excitations in Chryzene Glass Films // *Mol. Cryst. and Liq. Cryst.* – 2005. – V.427, – P. 149-157.
26. Ibrayev N. Kh., Afanasyev D.A. Effect of Magnetic Field on Triplet Excitons Annihilation in Langmuir-Blodgett Films // *Optics and Spectr.*– 2011. – V.110, N. 3, – P. 408-410.
27. Ibrayev N. Kh., Afanasyev D. A. Influence of magnetic field on delayed fluorecence of coumarin dye in Langmuir-Blodgett films // *Chem. Phys. Lett.* – 2012. – V. 538, – P. 39–45.
28. Afanasyev D.A., Ibrayev N.Kh., Saletsky A.M., Starokurov Y.V., Gun'ko V.M., Mikhalovsky S.V. Annihilation of the triplet excitons in the nanoporous glass matrices // *Journ. of Lumines.* – 2013. – V.136, – P. 358–364.
29. Aimukhanov A. K., Ibrayev N.Kh., Kucherenko M. G., Chmereva T. M. Kinetics of Photoreactions with Participation of Molecular Oxygen in Langmuir-Blodgett Films // *Optics and Spectr.* – 2013. – Vol. 114, No. 4. – P. 570–576.
30. Ibrayev N. Kh., Satybaldina D. Zh., Zhnusbekov A. M. Migration of the electronic excitation energy in Langmuir-Blodgett films of xanthene dyes // *Inter. Jour. of Modern Physics B.* – 2001. – Vol.15, No. 28-30, – P.3948-3951.
31. Ibrayev N. Kh. Anthracene-sensitized long-delayed rhodamine C fluorecence of the Langmuir-Blodgett films // *Rus. Phys. Jour.* – 2008. – V.51, No.7. – P.725-729.
32. Ibrayev N.Kh., Aimukhanov A.K., Seliverstova E.V. Interlayer Triplet-Triplet Energy Transfer in Nanosized Molecular Layers // *High Energy Chem.*, 2009. –V.43, No.7. – P.577-581.
33. Aimukhanov A.K., Ibrayev N. Kh., Seliverstova Y.V. Triplet-triplet enegy transfer in Langmuir-Blodgett films // *Rus. Jour. of Phys.Chem. A.* – 2010. – V.84, №. 11. – P.2115–2118.
34. Ibrayev N., Seliverstova E., Aimukhanov A., Serikov T. Role of Energy Transfer in Conversion of Light to Electric Energy // *Mol.Cryst. and Liq. Cryst.* – 2014. – Vol. 589, P. 202–208.
35. Ibrayev N. Kh., Seliverstova E. V., Artyukhov V. Ya. Dependence of the Efficiency of Triplet-Triplet Energy Transfer on the Distance Between the Donor and Acceptor // *Rus. Phys. Jour.* – 2015. –Vol. 57, No. 9, – P.1160–1164.
36. Ibrayev N., Seliverstova E., Nuraje N., Ishcenko A. FRET–designed dye–sensitized solar cells to enhance ligt harvesting // *Mat. Science in Semiconduct. Proces.* – 2015. – V. 31, P. 358-362.
37. Ibrayev N.Kh., Afanasyev D.A., Ishcenko A.A., Davidenko N.A. Specific Features of the Radiative Relaxation of Excited States of Polymethine Dyes of Different Ionicity in Films of Photoconductive and Nonphotoconductive Polymers // *Optics and Spectr.* – 2013. – V.114, No.1. – P. 66-71.
38. Ibrayev N.Kh., Afanasyev D.A., Ishcenko A.A., Davidenko N.A. Role of Triplet States of Polymethine Dyes in Photogeneration of Electron–Hole Pairs in Poly(N_ epoxypropylcarbazole) Films // *High Energy Chem.* – 2013. – Vol.47, No.2. – P. 41–45.
39. Ibrayev N.Kh., Afanasyev D.A., Ishcenko A.A., Davidenko N.A. Role of Spin States of Polymethine Dyes in the Generation of Electron-Hole Pairs // *Mol.Cryst. and Liq. Cryst.* – 2014. – Vol. 589, – P. 171– 177.
40. Ibrayev N.Kh., Zeinidenov A.K., Aimukhanov A.K. The laser active element based on dye on porous alumina // *Eurasian Chem.–Techn.l Jour.* – 2014.– Vol.16, №1. – P.73–78.
41. Ibrayev N.Kh., Zeinidenov A.K., Aimukhanov A.K. The Influence of Silver Nanoparticles on the Stimulated Luminescence of Rhodamine 6G Solutions // *Optics and Spectr.*– 2014. – Vol. 117, No. 4. – P. 540–544.
42. Ibrayev N.Kh., Zeinidenov A.K. Plasmon–enhanced stimulated emission of Rhodamine 6G in nanoporous alumina // *Laser Physics Letters*, 2014. – Vol. 11, №. 11. – P. 115805–115811.