

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ РЕСПУБЛИКИ БЕЛАРУСЬ
БЕЛОРУССКИЙ ОРДЕНА ТРУДОВОГО КРАСНОГО ЗНАМЕНИ
ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ

На правах рукописи

САЕЧНИКОВ КОНСТАНТИН АЛЕКСЕЕВИЧ

УДК 535.37

СПЕКТРОСКОПИЯ ОХЛАЖДЕННЫХ В СВЕРХЗВУКОВОЙ СТРУЕ
МОЛЕКУЛ ПРОИЗВОДНЫХ ФТАЛИМИДА И АНТРАЦЕНА И ИХ
ВАН-ДЕР-ВААЛЬСОВСКИХ КОМПЛЕКСОВ

01.04.05 - оптика

А В Т О Р Е Ф Е Р А Т

диссертации на соискание учёной степени
кандидата физико-математических наук

Минск - 1993

Работа выполнена на кафедре лазерной физики и спектроскопии Белорусского ордена Трудового Красного Знамени государственного университета

Научные руководители: доктор физико-математических наук, профессор Комяк А. И.

кандидат физико-математических наук, доцент Гулис И. М.

Официальные оппоненты: доктор физико-математических наук, профессор, Воропай Е. С.

кандидат физико-математических наук, доцент, Сенюк М. А.

Ведущее научно-исследовательское учреждение. Институт молекулярной и атомной физики АНБ

Защита состоится "29" 10 1993 года в 10 часов на заседании специализированного Совета К 056. 03. 01 по присуждению учёной степени кандидата наук при Белорусском государственном университете (220080, г. Минск, пр. Ф. Скорины, 4, ауд. 206).

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Белгосуниверситета

Автореферат разослан "28" 09 1993 г.

Учёный секретарь
Специализированного совета,
доцент


Чалой А. В.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы.

В спектроскопии сложных молекул в последние годы всё шире применяется метод получения тонкоструктурных электронно-колебательных спектров, основанный на адиабатическом охлаждении молекул в сверхзвуковой струе. Уже первые эксперименты показали его высокую универсальность, что свидетельствовало о больших возможностях и перспективах нового спектроскопического направления. В основе метода лежит принцип неравновесного охлаждения газа при адиабатическом расширении в вакуумную камеру через небольшое отверстие (сопло). При этом техника сверхзвуковых струй позволяет сравнительно просто получать молекулы с температурами вплоть до долей градуса Кельвина. Как известно, для сложных молекул в газовой фазе вследствие распределения по колебательным и вращательным уровням выявление тонкой структуры в спектрах поглощения и испускания оказывается, как правило, невозможным. Охлаждение молекул в сверхзвуковой струе приводит к значительному упрощению их электронно-колебательно-вращательных спектров и существенно облегчает получение спектроскопической информации. Наряду с анализом структуры спектров изолированных молекул данный метод позволяет исследовать процессы внутримолекулярного перераспределения энергии с селективно возбуждённых электронно-колебательных или колебательно-вращательных подуровней.

Особый интерес представляют ван-дерваальсовские (ВдВ) комплексы, охлаждённые в сверхзвуковой струе, их структура, спектры, влияние молекулы лиганда на фотофизические процессы, протекающие в возбуждённых состояниях сложных молекул, механизмы межмолекулярных взаимодействий и их спектроскопические проявления. При этом открывается возможность сопоставления и анализа в ряду: изолированная сложная молекула - ван-дер-ваальсовский комплекс с одной или несколькими молекулами "растворителя" - молекула в растворе.

Исследования спектроскопических характеристик изолированных молекул производных фталимида и антрацена, охлаждённых в сверхзвуковой струе, их ВдВ комплексов с молекулами растворителей, а также процессов перераспределения энергии в их воз-

буждённых состояниях и составило основное содержание данной работы.

Целью работы являлось:

- исследование особенностей вибронной структуры спектров изолированных сложных молекул производных фталимида и антрацена, широко исследованных ранее в растворах, с акцентом на изучение спектроскопических проявлений межмолекулярных взаимодействий;

- исследование структуры и спектров ван-дер-ваальсовских комплексов производных фталимида и антрацена с молекулами растворителей в сверхзвуковой струе;

- анализ механизмов влияния комплексообразования на вероятности безызлучательных переходов в синглетно-возбуждённых комплексах производных антрацена с молекулами растворителей.

Научная новизна полученных результатов.

1. Показано, что в молекулах производных фталимида в S_1 -состоянии имеет место ступенчатое внутримолекулярное перераспределение колебательной энергии.

2. Установлено существование структурных изомеров при формировании комплексов 9-цианоантрацена и 9,10-дибромантрацена с молекулами растворителей и температурной зависимости относительных концентраций изомеров разных типов в сверхзвуковой струе. Предложена модель, описывающая наблюдаемую температурную зависимость.

3. Предложен механизм влияния комплексообразования на вероятности безызлучательных переходов посредством индуцируемого низкочастотными ван-дер-ваальсовскими модами внутримолекулярного колебательного перераспределения, переводящего систему с оптически активных в оптически неактивные колебательные состояния.

На защиту выносятся следующие положения и результаты:

1. Внутримолекулярное колебательное перераспределение в сложных молекулах может иметь ступенчатый характер: при возбуждении обертонов или составных частот оптически активных колебаний в ходе перераспределения может сохраняться энергия кванта из возбуждаемой составной частоты.

2. Сдвиг линий в спектре возбуждения при формировании

ван-дер-ваальсовских комплексов производных фталимида и антрацена с молекулами растворителей определяется межмолекулярными взаимодействиями универсальной природы.

3. Результаты исследования формирования структурных изомеров в комплексах 9-цианоантрацена и 9,10-дибромантрацена с молекулами растворителей и их интерпретация на основе представлений о конкуренции межмолекулярных взаимодействий различных типов.

4. Результаты исследования влияния комплексообразования на квантовые выходы комплексов производных антрацена с аргоном и молекулами растворителей и их интерпретация.

Научная и практическая значимость результатов.

Полученные в работе результаты имеют значение для понимания механизмов и фотофизических процессов, протекающих в изолированных молекулах и их ван-дер-ваальсовских комплексах, охлаждённых в сверхзвуковой струе, дают представление о характере влияния партнёра по комплексу на процессы колебательного взаимодействия в возбуждённых состояниях молекул, участии ван-дер-ваальсовских мод комплекса и низкочастотных колебаний групп в молекуле в процессах внутримолекулярного колебательно-го перераспределения и их влияние на вероятности безызлучательных переходов. Результаты должны учитываться при интерпретации экспериментальных данных, полученных при исследовании молекул и их ван-дер-ваальсовских комплексов, охлаждённых в сверхзвуковой струе, а также при интерпретации результатов по тонкоструктурным спектрам, полученных другими методами (в парах, матрицах Шпольского и др.).

Аппаратурные решения, реализованные при создании установки, позволяющей проводить исследования спектральных и временных характеристик люминесценции молекул и их ван-дер-ваальсовских комплексов, охлаждённых в сверхзвуковой струе, могут найти применения как в аналогичных исследованиях, так и в смежных областях.

Апробация работы.

Результаты работы докладывались на VIII, IX Республиканских конференциях молодых учёных по спектроскопии и квантовой электронике (Вильнюс, 1987 и 1989), XX Всесоюзном

съезде по спектроскопии (Киев, 1988), Всесоюзном совещании "Люминесценция молекул и кристаллов" (Таллин, 1989), II конференции научно-учебного центра физико-химических методов исследования университета "Дружбы народов" им. Патриса Лумумбы (Москва, 1989), Всесоюзном семинаре "Спектроскопия свободных сложных молекул" (Минск, 1989), Всесоюзном совещании по молекулярной люминесценции (Караганда, 1989), Международной конференции "Современные проблемы лазерной физики и спектроскопии" (Гродно, 1993) Основные результаты диссертации изложены в 15 печатных работах и заявке на изобретение.

Личный вклад автора.

Основные результаты диссертационной работы получены автором самостоятельно. Научные руководители принимали участие в постановке задачи и обсуждении результатов исследований. В. А. Цвирко участвовал в проведении экспериментов.

Объём и структура диссертации.

Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения, списка литературы и изложена на 152 страницах машинописного текста, включая 17 рисунков и 16 таблиц. Список литературы, насчитывает 205 наименований.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении дано обоснование актуальности темы, сформулированы цель работы и защищаемые положения, отражена степень новизны и значимость результатов исследований, изложено краткое содержание диссертации по главам.

Первая глава диссертации содержит обзор литературных данных. В ней кратко рассмотрены вопросы, энергетика и внутримолекулярной динамики синглетно-возбуждённых состояний изолированных сложных молекул, охлаждённых в сверхзвуковой струе, получение ван-дер-ваальсовских комплексов, их спектры и структура. Рассмотрены механизмы перераспределения энергии в синглетно-возбуждённых состояниях изолированных молекул и комплексов.

Во второй главе излагается методика эксперимента. Описаны объекты исследования, дано описание установки для изучения спектральных и временных характеристик изолированных молекул и их ВдВ комплексов с молекулами растворителей, имеющей отличия от обычно используемых в исследованиях молекул в струе,

главным образом по источнику возбуждения и системе регистрации. Возбуждение осуществлялось преобразованным по частоте излучением струйного лазера на красителе с синхронной накачкой излучением второй гармоники АИГ: Nd^{3+} с непрерывной накачкой, акустооптической модуляцией добротности и пассивной синхронизацией мод, сложенным в кристалле КДП с основной частотой лазера накачки. В результате было получено перестраиваемое в ближней УФ области излучение с $\Delta\nu \sim 2 \text{ см}^{-1}$. При регистрации спектров возбуждения и флуоресценции использован метод счёта фотонов, для временных измерений использовалась стробоскопическая система регистрации. В случае слабых сигналов спектры могли накапливаться в многоканальном анализаторе. Установка также включает вакуумную систему с элементами поддержания и контроля вакуума, систему нагрева и контроля температуры образца, а также устройство насыщения газа-носителя парами растворителей для синтеза ВдВ комплексов.

В третьей главе анализируются особенности электронно-колебательной структуры спектров возбуждения флуоресценции и флуоресценции молекул производных фталимида, охлаждённых в сверхзвуковой струе. Показано, что в области низких значений колебательных энергий (до 700 см^{-1}) спектры возбуждения и флуоресценции при возбуждении в 0-0 полосе зеркально симметричны. Единственное резкое отступление от зеркальной симметрии, замеченное в низкочастотной области спектра, имеет место для двух линий с частотами 317 и 322 см^{-1} в 3-аминофталимиде (3-АФ) и 330 см^{-1} в 3-амино-N-метилфталимиде (3-АНМФ) - в спектрах флуоресценции эти линии оказываются практически необнаружимыми. Наблюдаемые отступления могут объясняться действием франк-кондоновских и (или) герцберг-теллеровских вкладов в вероятности соответствующих переходов. Выявлено, что характерной особенностью спектров обоих соединений является активность частоты 212 см^{-1} и 203 см^{-1} (обозначим их Ω) в 3-АФ и 3-АНМФ соответственно, проявляющихся как собственными обертонами, так и в составных частотах с другими фундаментальными колебаниями.

С использованием соотношения

$$\frac{I_{v_j', v_i''}}{I_{00}} = \left(\frac{v_j'}{v_i''} \right)^{2(v_i'' - v_j')} \left[L_{v_j', v_i''} (y^2) \right] \quad (1)$$

в спектрах флуоресценции обоих соединений проведён анализ распределения интенсивностей линий в прогрессиях по частоте, где $L_{\nu_i - \nu_i'}$ - обобщённый полином Лагерра, y - безразмерный параметр, определяемый сдвигом потенциальных кривых. Расчёт показал, что для прогрессий, формирующихся с 0-0 перехода и при возбуждении на колебательный подуровень с частотой α имеет место хорошее совпадение расчётных интенсивностей с экспериментальными при $y^2 = 1,4$ для обоих соединений. Этот результат свидетельствует о выполнении приближений в рамках которых справедливо (1) (адиабатическое, кондоновское, гармоническое), а также об отсутствии колебательного перераспределения во время жизни возбуждённого состояния при селективном заселении уровня с колебательной частотой α . Различия расчётных и экспериментальных результатов в распределениях интенсивностей линий в прогрессиях в спектрах флуоресценции обоих соединений обнаружены при возбуждении на уровень с колебательной частотой 2α . Это расхождение позволило сделать заключение о том, что при возбуждении уровня с $E_v = 2\alpha$ (E_v - колебательная энергия) в системе имеет место внутримолекулярное колебательное перераспределение (ВКП).

Предложен механизм "ступенчатого" ВКП, заключающийся в сохранении в ходе перераспределения энергии одного из квантов возбуждаемой составной (обертонной) частоты. Формально ВКП может быть представлено схемой: $E_v = 2\alpha \rightarrow \sum V_i'$, где "тёмные" состояния $\sum V_i'$ могут реализоваться различными наборами частот V_i' , большинство из которых представляют собой низкочастотные колебания. Если допустить, что указанные наборы низкочастотных колебаний в основном не содержат мод, имеющих скольнибудь существенную величину франк-кондоновского фактора для перехода $V_i' \rightarrow 0$, то переходы с испусканием из конечных для процесса ВКП состояний будут происходить по схеме, диктуемой принципом Франка-Кондона: $V_{00} + \sum V_i' \rightarrow \sum V_i'' + V_k''$, где $\sum V_i''$ - набор тех же мод, для основного состояния, что и V_i' для возбуждённого, а V_k'' - некоторые моды, активные в переходах $0 \rightarrow V_k''$. Иными словами, в пренебрежении дефектами частот ($V_i' \approx V_i''$), спектр релаксированного излучения по распределению интенсивностей будет подобен спектру флуоресценции из

состояния с $E_v = 0$. Базируясь на этих известных соображениях, можно было бы попытаться смоделировать экспериментально наблюдаемые распределения интенсивностей в спектрах 3-АФ и 3-АНМФ как результат суперпозиции расчётных спектров для переходов с уровней $E_v = 2a$ и $E_v = 0$. Однако, экспериментально наблюдаемое соотношение интенсивностей (в частности, большую интенсивность перехода, соответствующего по частоте переходу $2a \rightarrow a$) такой простой суперпозицией получить нельзя, так как в отрелаксированном спектре отсутствуют переходы с частотой, большей ν_{00} . С другой стороны, если допустить, что в процессе ВКП существует значительная вероятность заселения уровней $\sum \nu_i'$, содержащих частоту a (являющуюся активной), то спектр излучения с таких уровней будет подобен спектру флуоресценции из состояния с $E_v = a$. В рамках такого предположения экспериментально наблюдаемое распределение интенсивностей легко моделируется в виде суперпозиции трёх спектров (с $E_v = 0, a$ и $2a$), взятых с весами $\sim 8\%$; $\sim 40\%$ и $\sim 52\%$ для 3-АНМФ и с весами $\sim 0\%$; $\sim 75\%$ и $\sim 25\%$ для 3-АФ. Таким образом, для интерпретации спектра флуоресценции с уровня $E_v = 2a$ необходимо привлечь модель, включающую "ступенчатую" релаксацию с сохранением энергии одного кванта частоты a ; при этом, как следует из значений приведённых весов, этот процесс в случае 3-АФ и 3-АНМФ характеризуется большей вероятностью, чем процесс преобразования состояния с $E_v = 2a$ в состояние, не содержащее активного кванта. Так как ВКП управляется, наряду с плотностью конечных состояний, также франк-кондоновским фактором, можно предположить, что определяющим в общем вероятностном балансе процесса является сниженный запрет на изменение одного (вместо двух) колебательного кванта a .

В четвёртой главе обсуждаются особенности формирования тонкоструктурных электронно-колебательных спектров ван-дер-ваальсовских комплексов исследуемых молекул с атомами аргона и молекулами растворителей (колебательная структура спектров, проявление ван-дер-ваальсовских низкочастотных колебаний, изомеры, комплексы сложного состава). Выявлено, что появление не одной, а нескольких полос, ассоциируемых с образованием комплекса (или комплексов), - ситуация достаточно частая. Анализ

спектральных сдвигов, соотношения интенсивностей и его изменение при изменении давления газа-носителя позволил интерпретировать группы близких полос как соответствующие O-O переходам в изомерах комплексов, т.е. комплексах различной пространственной структуры. Для комплексов, образующихся с аргоном или аммиаком (9-цианоантрацен (9-CNA)), наличие нескольких полос связано с присоединением различного числа молекул (атомов) комплексообразующего агента к сложной молекуле. Показано, что при комплексообразовании имеет место приближённая аддитивность в величинах сдвигов, вносимых каждой присоединяющейся частицей. Такая же аддитивность имеет место и при формировании комплексов сложного состава (например 9-CNA+H₂O+Ar, 9,10-дибромантрацен (9,10-DBrA)+CH₃OH+Ar и др.). Для комплексов 9-CNA с ацетонитрилом получены линии, взаимное расположение и соотношение интенсивностей которых позволяют рассматривать их как короткую прогрессию по низкочастотной 22 см⁻¹ ВДВ моде. Установлено, что комплексообразование приводит к изменению частот некоторых внутримолекулярных колебаний.

Показано, что сдвиги спектров возбуждения флуоресценции изолированных сложных молекул при комплексообразовании определяются преимущественным вкладом сил межмолекулярных взаимодействий универсальной природы. О роли дисперсионных взаимодействий в формировании сдвигов линий в спектрах возбуждения свидетельствуют результаты исследования комплексообразования 9-CNA со спиртами (удлинение алифатической цепи при незначительном изменении дипольного момента в ряду спиртов приводит к увеличению спектральных сдвигов), вклад ориентационных взаимодействий подтверждается результатами исследования комплексообразования 9-CNA с хлорзамещёнными метана, ацетонитрилом, 9,10-DBrA и 9,10-дихлорантрацена (9,10-DClA) с полярными молекулами растворителей, 3-АФ с водой и метанолом. Кроме того, для комплексов 3-АФ с метанолом при сопоставлении "сольватохромных" сдвигов спектров поглощения в струе и в растворе метанола оценено, что наблюдаемая в комплексе величина сдвига 355 см⁻¹ представляет одну десятую от сдвига, создаваемого заполненной координационной сферой.

Для комплексов 9-CNA с хлорзамещёнными метана и 9,10-DBrA

с ацетонитрилом выявлено существование температурной зависимости относительных концентраций изомеров различного типа в сверхзвуковой струе. Предложенная модель, описывающая наблюдаемую температурную зависимость, базируется на представлении о формировании за счёт конкуренции межмолекулярных взаимодействий различных видов нескольких минимумов на потенциальной поверхности, описывающей энергию взаимодействия в комплексе. Если энергетический барьер для перехода комплекса из одной пространственной конфигурации в другую достаточно высок, то при низкой температуре молекул в струе в ходе формирования комплексов происходит быстрое "замораживание" молекул лигандов на поверхности молекулы "хозяина", формируется ряд изомеров различных пространственных конфигураций (в разных потенциальных минимумах). Отметим, что с термодинамической точки зрения ансамбль комплексов является неравновесным. При более высокой температуре системы открывается возможность переходов через потенциальные барьеры, ансамбль приближается к равновесию, и формируются только более устойчивые комплексы (с более глубокими минимумами).

Пятая глава посвящена исследованию механизмов влияния комплексообразования на вероятности безызлучательных переходов с различных вибронных уровней S_1 -состояний комплексов молекул производных антрацена с аргоном и растворителями. Показано, что в области низких значений колебательной энергии комплексообразование может приводить как к уменьшению, так и увеличению квантового выхода, что связано с изменением резонансных условий для интеркомбинационной конверсии. Это подтверждается "осцилляторным" характером зависимости квантового выхода от энергии колебательного возбуждения для комплексов 9-DC1a с Ag, 9,10-DBrA с Ag и молекулами растворителей, 9-CNA с метилendioхлоридом для области частот меньших 700 см^{-1} . В области высоких значений колебательных энергий рост квантовых выходов при комплексообразовании обусловлен действием механизма преддиссоциации и / или "микроскопической релаксации растворителя". Это подтверждают результаты исследования комплексообразования 9-CNA и 9,10-DBrA с Ag для области колебательных энергий $>700 \text{ см}^{-1}$.

Предложен механизм влияния комплексообразования на вероятность интеркомбинационной конверсии в синглетно-возбуждённых состояниях комплексов. Как и в случае ВКП для изолированных молекул, в возбуждённом S_1 -состоянии комплексов происходит превращение энергии первоначально заселяемого оптически активного колебания в энергию некоторого изоэнергетического ему уровня состояния S_1 . В случае ВдВ комплексов этот изоэнергетический уровень включает в себя в качестве составляющих низкочастотные ВдВ моды. Наличие ВдВ мод существенно повышает плотность колебательных состояний и, следовательно, вероятность ВКП в комплексе в сравнении с изолированной молекулой. Оставшаяся "внутримолекулярная" колебательная энергия может быть достаточно большой, чтобы переход $S_1 \rightarrow T_x$ оставался энергетически возможным (в этом содержится отличие предлагаемого механизма от механизма "микроскопической релаксации растворителя" обсуждавшегося в литературе). Однако, в результате ВКП подансамбль оптически заселяемых (активных состояний) преобразуется в подансамбль оптически неактивных состояний. Вероятности безызлучательных переходов (ИКК) с уровней, принадлежащих этим двум подансамблям должны отличаться, причём вероятность ИКК с оптически активных уровней ниже, т. к. конечными для ИКК колебательными уровнями в основном являются уровни неактивные, поэтому франк-кондоновские факторы и симметричные запреты должны снижать вероятность безызлучательных переходов. Приведённое рассмотрение подтверждается экспериментальными результатами по падению времён затухания люминесценции 9-CNA при переходе от холодной сверхзвуковой струи к газовой фазе. Предложенный механизм хорошо объясняет резкое уменьшение квантовых выходов флуоресценции 9-CNA при образовании комплексов с аргоном и молекулами растворителей для уровней с $E_v \neq 0$.

В заключительной части диссертации кратко сформулированы **ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ:**

1. Анализ тонкоструктурных электронно-колебательных спектров производных фталимида, охлаждённых в сверхзвуковой струе, выявил зеркальную симметрию спектров возбуждения и флуоресценции относительно частоты 0-0 перехода; показано, что распределения интенсивностей линий для прогрессивнообразующих и

комбинирующих с ними частот в спектрах флуоресценции описываются в рамках адиабатического, гармонического и франк-кондонского приближений.

2. Показано, что в молекулах производных фталимида, охлаждённых в сверхзвуковой струе, в S_1 -состоянии имеет место ступенчатое внутримолекулярное перераспределение колебательной энергии.

3. Экспериментально установлено, что при образовании ван-дер-ваальсовских комплексов сложного состава (сложная молекула - молекула растворителя - (атом инертного газа)ⁿ, где n = 1-3) имеет место приближённая аддитивность в величинах спектральных сдвигов линий, вносимых каждой присоединяющейся частицей.

4. Установлено, что сдвиги спектров возбуждения флуоресценции изолированных сложных молекул в составе ван-дер-ваальсовских комплексов определяются межмолекулярными взаимодействиями универсальной природы.

5. Для комплексов производных антрацена с молекулами растворителей установлено существование структурных изомеров - комплексов различной пространственной конфигурации. Дана интерпретация температурной зависимости относительных концентраций изомеров различного типа в струе, базирующаяся на представлении о формировании за счёт конкуренции межмолекулярных взаимодействий различных видов нескольких минимумов на потенциальной поверхности, описывающей энергию взаимодействия в комплексе.

6. Изучено влияние комплексообразования на вероятности безызлучательных переходов с различных вибронных уровней S_1 -состояния. В области низких значений колебательной энергии комплексообразование может приводить как к уменьшению, так и увеличению квантового выхода флуоресценции, что связано с изменением резонансных условий для интеркомбинационной конверсии. В области высоких значений колебательной энергии рост квантовых выходов при комплексообразовании обусловлен действием механизмов преддиссоциации и "микроскопической релаксации растворителя".

7. Предложен механизм влияния комплексообразования на ве-

роятности безызлучательных переходов посредством индуцируемого низкочастотными ван-дер-ваальсовскими модами внутримолекулярного колебательного перераспределения, переводящего систему с оптически активных в оптически неактивные колебательные состояния, что приводит к росту вероятности интеркомбинационной конверсии.

Основное содержание диссертации опубликовано в следующих работах:

1. Саечников К. А., Цвирко В. А. Тонкоструктурные спектры З-АФ и его ван-дер-ваальсовских комплексов, охлаждённых в сверхзвуковой струе // Тез. докл. VIII Респ. конф. молод. учёных по спектроскопии и квантовой электронике. Вильнюс, 1987. С. 93.
2. Гулис И. М., Комяк А. И., Саечников К. А., Цвирко В. А. Тонкоструктурная флуоресцентная спектроскопия холодных изолированных молекул З-АФ и его комплексов // Тез. докл. Всесоюз. совещания "Люминесценция молекул и кристаллов". Таллин, 1987. С. 59.
3. Гулис И. М., Саечников К. А., Цвирко В. А. Твёрдотельный лазер // Авторское свидетельство N 4063711/31-25 от 25.01.88.
4. Гулис И. М., Комяк А. И., Саечников К. А., Цвирко В. А. Тонкоструктурная спектроскопия многоатомных молекул, охлаждённых в сверхзвуковой струе // Тез. докл. XX Всесоюз. съезда по спектроскопии. Киев, 1988. Ч. 1, С. 387.
5. Гулис И. М., Саечников К. А. Узкополосный источник пикосекундных импульсов с непрерывной перестройкой в видимой и ультрафиолетовой областях // Вестник БГУ. Сер. 1. 1989. N 1, С. 6-8.
6. Гулис И. М., Саечников К. А. Спектроскопия охлаждённых в сверхзвуковой струе изолированных сложных молекул и ван-дер-ваальсовских комплексов // Тез. докл. II конф. научно-учебного центра физико-химических методов исследования университета "Дружбы народов" им. Патриса Лумумбы М., 1989. С. 107.
7. Гулис И. М., Комяк А. И., Саечников К. А. Молекулярные комплексы в сверхзвуковой струе // Всесоюз. семинар "Спектроскопия свободных сложных молекул" Мн., 1989. С. 16.
8. Гулис И. М., Комяк А. И., Саечников К. А., Цвирко В. А. Флуоресцентная спектроскопия охлаждённых в сверхзвуковой струе мо-

лекул 3-АФ // ЖПС. 1989. Т. 50, N 3. С. 385-391.

9. Гулис И. М., Саечников К. А., Цвирко В. А. Установка для исследования электронно-колебательных спектров сложных молекул, охлаждённых в сверхзвуковой струе // Вестник БГУ. Сер. 1. 1989. N 2, С. 19-21.

10. Гулис И. М., Комяк А. И., Саечников К. А., Цвирко В. А. Спектры ван-дер-ваальсовских комплексов 3-АФ с полярными молекулами в сверхзвуковой струе // ЖПС. 1989. Т. 50, N 5. С. 853-855.

11. Гулис И. М., Саечников К. А. Флуоресцентная тонкоструктурная спектроскопия охлаждённых в сверхзвуковой струе комплексов сложных молекул // Тез. докл. "Всесоюз. совещания по молекулярной люминесценции". Караганда, 1989. С. 2.

12. Гулис И. М., Саечников К. А. Спектроскопия комплексов сложных молекул в сверхзвуковой струе // Вестн. АНБССР. Сер. физ.-мат., 1989. С. 63-70.

13. Саечников К. А., Цвирко В. А. Особенности формирования комплексов 9-СНА с молекулами полярных растворителей в сверхзвуковой струе // Тез. докл. IX Респ. конф. молод. учёных по спектроскопии и квантовой электронике. Вильнюс, 1989. С. 70.

14. Гулис И. М., Комяк А. И., Саечников К. А. Зависимость квантовых выходов флуоресценции от запаса колебательной энергии в изолированных комплексах 9,10-дихлор- и 9-цианоантрацена с аргоном // ЖПС. 1992. Т. 56, N 5-6. С. 793-798.

15. Гулис И. М., Комяк А. И., Саечников К. А., Цвирко В. А. Ступенчатое внутримолекулярное перераспределение колебательной энергии в состоянии S1 молекул 3-амино- и 3-амино-N-метилфтальмида // ЖПС. 1993. Т. 58, N 1-2. С. 58-63.

16. Гулис И. М., Саечников К. А. Влияние комплексообразования на безызлучательные переходы с колебательных подуровней S1-состояний молекул 9,10-дибром- и 9-цианоантрацена, охлаждённых в сверхзвуковой струе // Тез. Международной конф. "Современные проблемы лазерной физики и спектроскопии". Гродно. 1993. С. 130-132.



РЕПОЗИТОРИЙ БГПУ

Подписано к печати 27.09.93. Формат 60x84/16
Объём 1,0 п. л. Тираж 100 экз. Заказ 404
Отпечатано на роталпринте БГУ им. В. И. Ленина
220080, Минск, ул. Вобруйская, 7.