

На правах рукописи

**ПЕТИН Алексей Николаевич**

**Селективная многофотонная ИК диссоциация молекул SF<sub>6</sub> и CF<sub>3</sub>I  
в неравновесных условиях импульсного газодинамически охлаждённого  
молекулярного потока, взаимодействующего с твёрдой поверхностью**

Специальность: 01.04.05 - Оптика

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание учёной степени  
кандидата физико-математических наук

Москва – 2015

Работа выполнена в отделе лазерной спектроскопии Федерального государственного бюджетного учреждения наук Институт спектроскопии Российской академии наук (ИСАН)

Научный руководитель: доктор физ.-мат. наук,  
МАКАРОВ Григорий Николаевич,  
ИСАН, главный научный сотрудник отдела  
лазерной спектроскопии

Официальные оппоненты: доктор физ.-мат. наук, профессор,  
ГОРДИЕНКО Вячеслав Михайлович,  
Московский государственный университет имени  
М.В. Ломоносова, физический факультет,  
заведующий лабораторией нелинейной оптики  
  
доктор физ.-мат. наук,  
ВИГАСИН Андрей Алексеевич,  
Институт физики атмосферы им. А.М. Обухова  
РАН, ведущий научный сотрудник

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное  
учреждение науки Институт проблем лазерных и  
информационных технологий Российской академии  
наук (ИПЛИТ РАН)

Защита диссертации состоится “9” апреля 2015 г. в 14 час. 00 мин. на заседании диссертационного совета Д 002.014.01 при Федеральном государственном бюджетном учреждении наук Институт спектроскопии Российской академии наук (ИСАН) по адресу: 142190, г. Москва, г. Троицк, ул. Физическая, д. 5.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Института спектроскопии и на сайте ИСАН по адресу: [http://isan.troitsk.ru/ru/diss\\_sovet.php](http://isan.troitsk.ru/ru/diss_sovet.php).

Отзывы на автореферат (два заверенных экземпляра) просим направлять на адрес диссертационного совета.

В отзыве указываются фамилия, имя, отчество лица, представившего отзыв, почтовый адрес, телефон, адрес электронной почты, наименование организации, работником которой является указанное лицо, и должность в этой организации (выдержка из Положения о порядке присуждения ученых степеней).

Автореферат разослан “ \_\_\_ ” \_\_\_\_\_ 2015 г.

Учёный секретарь  
диссертационного совета  
кандидат физ.-мат. наук



Каримуллин К.Р.

## Общая характеристика работы

Диссертация посвящена исследованию изотопически-селективной ИК многофотонной диссоциации (МФД) молекул  $\text{SF}_6$  и  $\text{CF}_3\text{I}$  в импульсном газодинамически охлаждённом молекулярном потоке и в потоке, взаимодействующем с твёрдой поверхностью.

### Актуальность темы

Изотопы химических элементов в настоящее время получили широкое применение в медицине, биологии, геологии, ядерной энергетике, микроэлектронике, химии и научных исследованиях [1]. На протяжении многих лет потребность в изотопах углерода, кислорода, азота с каждым годом только возрастала [1]. Растущий спрос на стабильные изотопы стимулировал поиск новых высокопроизводительных экономичных методов разделения изотопов.

Наряду с существующими традиционными методами разделения изотопов (электромагнитный метод масс – сепарации, кинетические и физико-химические методы разделения) сейчас широкое распространение получают методы с использованием лазерного излучения [1,2]. Этому в большой степени способствуют потенциальные преимущества лазерных методов. В традиционных методах селективность на одной ступени, как правило, не превышает величину 1,05. Лазерные методы обеспечивают получение селективности  $\alpha$  в диапазоне от десятков единиц до десяти тысяч [2]. Для лазерных методов также характерно малое время выхода на стационарный режим.

Лазерные методы могут быть применимы с довольно высокой эффективностью для разделения изотопов любых элементов – лёгких, средних и тяжёлых, в то время как эффективность традиционных методов зависит от массы обогащаемого изотопа. Так, для лазерного разделения изотопов, молекулярные соединения которых имеют колебательные частоты в области  $400\text{-}900\text{ см}^{-1}$ , (например, в случае  $\text{UF}_6$   $\nu_3 \approx 626\text{ см}^{-1}$ ) разработаны и успешно применены лазеры с оптической накачкой ( $\text{NH}_3$ -лазер и лазер на пара-водороде) [3-5]. В случае исследования лазерного разделения изотопов кремния ( $\text{Si}_2\text{F}_6$ ) и молибдена ( $\text{MoF}_6$ ) используются лазеры на свободных электронах (рабочий диапазон частот излучения от  $700$  до  $1000\text{ см}^{-1}$ ) [6,7].

Одним из перспективных методов для разделения изотопов средних масс сейчас считается метод, основанный на явлении изотопически-селективной многофотонной диссоциации молекул интенсивным инфракрасным лазерным излучением. К числу достоинств метода относится использование перестраиваемых по частоте излучения импульсных  $\text{CO}_2$ -лазеров (источник ИК излучения). Частота повторения импульсов  $\text{CO}_2$ -лазера может достигать до  $400\text{ Гц}$  при средней мощности излучения несколько киловатт, с коэффициентом полезного действия (КПД 5-10%). Он достаточно прост в эксплуатации и доступен по цене.

Для разделения изотопов углерода метод ИК МФД был доведён до практической реализации. В недавнем прошлом в Калининграде был построен и успешно функционировал завод по разделению изотопов углерода на основе изотопически-селективной многофотонной диссоциации молекул  $\text{CF}_2\text{HCl}$  [фреона-22] импульсно-периодическим  $\text{CO}_2$ -лазером.

Исследования ИК многофотонной диссоциации молекул в условиях газодинамически охлаждённого потока являются актуальными в связи с потенциальной возможностью применения МФД для лазерного разделения изотопов, в том числе изотопов тяжёлых элементов. В спектрах ИК поглощения молекул, содержащих тяжёлые элементы или, например, кремний, изотопические сдвиги  $\Delta_{is}$  малы. Так, для молекул  $\text{UF}_6$ ,  $\text{WF}_6$ ,  $\text{OsO}_4$  -  $\Delta_{is} \leq 1 \text{ см}^{-1}$ , для кремнийсодержащих молекул  $\Delta_{is} \leq 5\text{-}10 \text{ см}^{-1}$  [8]. Поэтому измеренные при комнатной температуре спектры линейного и многофотонного поглощения (МФП) молекул, содержащих разные изотопы, практически полностью перекрываются. Глубокое же охлаждение, достигаемое в условиях сверхзвуковых струй и потоков, приводит к резкому сужению полос линейного и многофотонного поглощения. Из-за этого селективность многофотонного возбуждения и диссоциации молекул, содержащих тяжёлые элементы, значительно возрастает [8-11]. В частности, использование охлаждения молекул  $\text{UF}_6$  в смеси с газом-носителем в газодинамических потоках лежит в основе одного из развиваемых в настоящее время лазерных методов разделения изотопов урана [4,5].

В работе [5] сообщается о лазерном разделении изотопов урана в условиях, когда переохлаждённая смесь  $\text{UF}_6$  с  $\text{CH}_4$ , Ar или Kr облучалась на выходе из сверхзвукового сопла (температура  $\sim 100 \text{ K}$ ). В качестве источника лазерного излучения, был использован пара-водородный рамановский лазер. Достигнута селективность разделения  $\alpha \approx 4$ .

Молекулярные струи использовались также для разделения изотопов серы, предотвращая при помощи лазерного излучения образование кластеров  $^i\text{SF}_6\text{Ar}_{(n)}$  с нежелательным изотопом  $^i\text{S}$  в сверхзвуковой струе смеси газов  $\text{SF}_6$  и Ar [12]. В условиях газодинамического расширения смеси газов в вакуум часто происходит образование димеров и кластеров. Так, в сверхзвуковой струе смеси газов  $\text{SF}_6$  и Ar наблюдается образование кластеров  $^i\text{SF}_6\text{Ar}_{(n)}$ . Было обнаружено, что возбуждая непрерывным  $\text{CO}_2$ -лазером изотопомер  $^i\text{SF}_6$  на выходе из сверхзвукового сопла (в зоне кластеризации), можно эффективно препятствовать возникновению кластеров  $^i\text{SF}_6\text{Ar}_{(n)}$ . Так как скорость диффузии в радиальном направлении зависит от молекулярной массы,  $^i\text{SF}_6$  выталкивается из центра сверхзвуковой струи, и в центре струи происходит обеднение  $\text{SF}_6$  изотопомером  $^i\text{SF}_6$ . Преимущество метода заключается в том, что для предотвращения кластеризации требуется гораздо меньше энергии (не более одного ИК фотона на молекулу  $\text{SF}_6$ ), чем для МФД. Сейчас этот метод рассматривается как потенциальный метод разделения изотопов урана [13].

К настоящему времени разработаны и опробованы также другие схемы лазерного разделения изотопов с использованием газодинамических молекулярных потоков. Например, в работах [14,15] представлены результаты экспериментов, в которых исследовалось взаимодействие колебательно возбуждённых молекул SF<sub>6</sub> и CF<sub>3</sub>I ( $0,3 \text{ эВ} \leq E_{\text{кол}} \leq 2 \text{ эВ}$ ) с конденсированными на холодной поверхности ( $T_{\text{п}} \approx 80-85 \text{ К}$ ) молекулами (кластерами). Установлено, что колебательно-возбуждённые CO<sub>2</sub>-лазером молекулы SF<sub>6</sub> и CF<sub>3</sub>I значительно эффективнее проходят через охлаждённые до  $T_{\text{п}} \approx 80-85 \text{ К}$  металлические многоканальные пластинки и конусы по сравнению с невозбуждёнными молекулами. Поэтому возбуждая молекулы с нужным изотопом, можно разделить их по изотопному составу.

Рассматривался также метод разделения изотопов серы, основанный на селективном захвате молекул SF<sub>6</sub> кластерами Хе в пересекающихся кластерном и молекулярном пучках [16]. Недостаток этих методов – довольно низкая производительность. Так, через пластинки или конус проходит не более 10 % падающих на них молекул.

Благодаря сравнительно высоким значениям селективности и выхода продуктов диссоциации, рассматриваемый в диссертации метод разделения изотопов является довольно эффективным. Новые же термодинамически неравновесные условия, реализуемые в скачке уплотнения, представляют самостоятельный научный интерес. Многофотонные процессы в таких условиях ранее не изучались. Исследования МФД молекул в скачке уплотнения позволяют также выяснить роль колебательной и вращательной температур молекул в процессе формирования изотопической селективности МФД молекул.

**Цель диссертационной работы** заключается в экспериментальном исследовании изотопически-селективной ИК многофотонной диссоциации молекул SF<sub>6</sub> и CF<sub>3</sub>I в импульсном газодинамически охлаждённом молекулярном потоке и в потоке, взаимодействующем с поверхностью, в том числе в скачке уплотнения, где для эффективных температур молекулярного газа выполняются условия  $T_{2,\text{п}} \geq T_{2,\text{вр}} > T_{2,\text{кол}}$ , „обратные” условиям в невозмущённом сверхзвуковом молекулярном потоке:  $T_{1,\text{п}} \leq T_{1,\text{вр}} < T_{1,\text{кол}}$  ( $T_{1,\text{п}}$ ,  $T_{1,\text{вр}}$ ,  $T_{1,\text{кол}}$  - поступательная, вращательная и колебательная температуры молекул, соответственно).

### **Научная новизна работы**

1. Впервые изучена селективная ИК многофотонная диссоциация молекул SF<sub>6</sub> и CF<sub>3</sub>I в новых термодинамически неравновесных условиях скачка уплотнения ( $T_{2,\text{п}} \geq T_{2,\text{вр}} > T_{2,\text{кол}}$ ), обратных неравновесным условиям, реализуемым в сверхзвуковых струях и потоках ( $T_{1,\text{п}} \leq T_{1,\text{вр}} < T_{1,\text{кол}}$ ).

2. Получены спектральные и энергетические характеристики ИК МФД молекул  $SF_6$  и  $CF_3I$ , а также измерены селективности в продуктах  $SF_4$  и  $C_2F_6$  при возбуждении молекул в неравновесных условиях: невозмущённого молекулярного потока и потока, взаимодействующего с поверхностью.

3. Установлено, что за счёт формирования скачка уплотнения перед твёрдой поверхностью можно существенно увеличить выход продуктов ИК МФД молекул в газодинамически охлаждённых струях и потоках без значительного снижения селективности.

4. Выяснена роль колебательной и вращательной температур молекул  $SF_6$  в формировании изотопической селективности ИК МФД.

### **Практическая значимость результатов**

Практическая значимость результатов определяется потенциальной возможностью применения изотопически-селективной ИК МФД молекул для лазерного разделения изотопов, в том числе, изотопов тяжёлых элементов.

Результаты исследований ИК МФД молекул в скачке уплотнения важны и в связи с разработками новых низкоэнергетических методов лазерного разделения изотопов. Так, установлено, что значительный вклад в выход продуктов обеспечивает столкновительная диссоциация молекул, возбуждённых значительно ниже порога диссоциации. В случае возбуждения молекул  $SF_6$  в ударной волне при плотности энергии лазерного излучения  $\leq 1$  Дж/см<sup>2</sup> выход продуктов в 30-50 раз превышает выход продуктов диссоциации в невозмущённом потоке.

Предложенный нами метод (МФД в скачке уплотнения) представляет интерес в случае селективной многофотонной диссоциации больших многоатомных молекул, имеющих достаточно большие времена жизни ( $\geq 100-200$  мкс) по отношению к мономолекулярному распаду даже при уровнях колебательного возбуждения, значительно превышающих энергию диссоциации. Например, молекулы  $(CF_3)_3CX$ , где X - атом галогена или водорода. Такие перевозбуждённые молекулы долетают до стенок камеры и релаксируют на них, не образуя конечных продуктов. Формирование же скачка уплотнения для молекулярного газа таких молекул может значительно увеличить вклад столкновительной диссоциации и тем самым увеличить выход продуктов.

### **Положения, выносимые на защиту**

1. Первая реализация изотопически-селективной ИК МФД молекул в новых термодинамически неравновесных условиях ( $T_{2,п} \geq T_{2,вр} > T_{2,кол}$ ), обратных неравновесным условиям, реализуемым в сверхзвуковых струях и потоках ( $T_{1,п} \leq T_{1,вр} < T_{1,кол}$ ).

2. Спектральные и энергетические характеристики ИК МФД молекул SF<sub>6</sub> и CF<sub>3</sub>I, полученные при возбуждении в импульсном газодинамически охлаждённом молекулярном потоке, взаимодействующем с поверхностью, существенно отличаются от таковых полученных в невозмущённом потоке.

3. Выход продуктов ИК многофотонной диссоциации молекул SF<sub>6</sub> и CF<sub>3</sub>I при возбуждении в скачке уплотнения возрастает более чем на порядок по сравнению со случаем, когда молекулы возбуждаются в невозмущённом молекулярном потоке. При этом селективность в продуктах падает не более чем на 25 %.

4. В формировании изотопической селективности процесса ИК многофотонной диссоциации SF<sub>6</sub> основную роль играет колебательная температура молекул, а не вращательная.

### **Апробация работы и публикации**

Основные результаты диссертации докладывались на 5-й Всероссийской (международной) конференции. // Физико-химические процессы при селекции атомов и молекул. (Звенигород. 2-6 октября 2000 года) и на научных семинарах в Институте спектроскопии РАН. Результаты, на основании которых написана диссертация, опубликованы в 10 печатных работах. Из них 9 статей - в рецензируемых журналах и 1 работа - тезисы доклада на Всероссийской (международной) научной конференции.

### **Личный вклад автора**

Представленные в диссертации результаты получены лично автором или совместно с научным руководителем Г.Н. Макаровым.

### **Структура и объём диссертации**

Диссертация состоит из введения, трёх глав, заключения и списка цитируемой литературы. Полный объём диссертации составляет 125 страниц, включая 26 рисунков, 3 таблицы и список литературы из 117 наименований.

### **Основное содержание диссертации**

**Во Введении** сформулированы основные задачи диссертационной работы, обоснованы актуальность и научная новизна проводимых исследований, представлены положения, выносимые на защиту.

**Первая глава** посвящена исследованию изотопически-селективной ИК многофотонной диссоциации молекул SF<sub>6</sub> и CF<sub>3</sub>I, охлаждённых в сверхзвуковом импульсном молекулярном потоке. В таких условиях плотность облучаемого газа

сравнительно низкая. Длина свободного пробега молекул гораздо больше характерного размера облучаемого объёма. Время возбуждающего лазерного импульса оказывается меньше среднего времени между столкновениями. МФД молекул под действием лазерного излучения в этом случае происходит практически без участия столкновений, то есть имеет чисто радиационный характер. Исследования ИК многофотонной диссоциации  $SF_6$  и  $CF_3I$  в невозмущённом молекулярном потоке важны потому, что полученные результаты можно сопоставить с данными по многофотонной диссоциации молекул в падающем на поверхность потоке и в скачке уплотнения.

Как хорошо известно, конечные температуры молекулярного газа, достигаемые за счёт охлаждения в сверхзвуковых струях и потоках, очень низкие ( $T_{1,п} \approx T_{1,вр} \approx 40$  К,  $T_{1,кол} \approx 150$  К [8,10,11,17]) и для них выполняется соотношение:

$$T_{1,п} \leq T_{1,вр} < T_{1,кол}, \quad (1)$$

где  $T_{1,п}$ ,  $T_{1,вр}$ ,  $T_{1,кол}$  - поступательная, вращательная и колебательная температуры молекул, соответственно.

Схема экспериментальной установки представлена на рис. 1. Установка включает в себя вакуумную камеру, импульсное сопло, импульсный  $CO_2$ - лазер и систему регистрации.

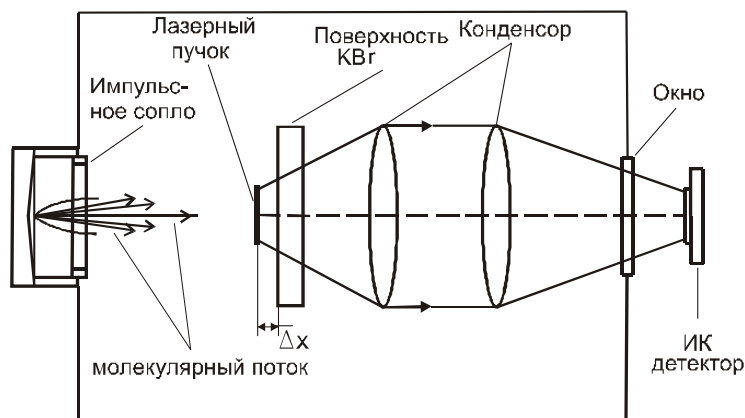


Рис. 1. Схема экспериментальной установки

Многофотонная диссоциация молекул  $SF_6$  исследовалась методом детектирования люминесценции  $HF^*$  ( $\lambda \approx 2,5$  мкм) и путём сбора и анализа продукта  $SF_4$ . В продукте  $SF_4$  был измерен коэффициент обогащения его редким изотопом  $^{34}S$ . Метод детектирования  $HF^*$  люминесценции заключается в следующем. Продукты МФД молекул  $SF_6$  атомы фтора в результате химической реакции с молекулами водорода или метана образуют колебательно возбуждённые молекулы  $HF^*$ . Интенсивность спонтанного излучения таких колебательно-возбуждённых молекул как показано в работе [18], хорошо коррелирует с выходом продукта  $SF_4$ .



В экспериментах с молекулой  $\text{CF}_3\text{I}$  измерялся выход продукта  $\text{C}_2\text{F}_6$ .

В главе 2 описаны результаты исследований ИК многофотонной диссоциации молекул  $\text{SF}_6$  и  $\text{CF}_3\text{I}$  в неравновесных условиях ударной волны (скачка уплотнения) и в сверхзвуковом потоке, падающем на твёрдую поверхность. Хорошо известно что, в случае ИК многофотонной диссоциации многоатомных молекул, охлаждённых в сверхзвуковых струях и потоках, химические реакции, приводящие к образованию конечных продуктов, из-за малой плотности и низкой температуры газа протекают очень медленно. Из-за этого значительная часть радикалов может теряться на стенках вакуумной камеры, не образуя химически устойчивых продуктов. Например, это происходит в случае МФД молекул  $\text{CF}_3\text{I}$  [19,20]. Поэтому мы поставили задачу найти экспериментальные условия, обеспечивающие высокий выход продуктов ИК МФД молекул  $\text{SF}_6$  и  $\text{CF}_3\text{I}$  без значительного снижения селективности. Мы обнаружили, что в скачке уплотнения эффективность ИК МФД молекул (выход продуктов) значительно повышается. Так, выход продуктов многофотонной диссоциации молекул  $\text{SF}_6$  и  $\text{CF}_3\text{I}$  в ударной волне как минимум на порядок увеличивается по сравнению со случаем возбуждения молекул в сверхзвуковой струе или потоке. При этом изотопическая селективность ИК МФД уменьшается примерно на 20 – 25 %.

Организовать ударную волну достаточно просто. Из газодинамики хорошо известно, что если перпендикулярно распространению молекулярного сверхзвукового потока расположить пластину, то в результате взаимодействия молекул, отражённых от поверхности пластины с молекулами налетающего потока перед ней образуется ударная волна [21]. При этом величина фронта ударной волны оценивается равной длине свободного пробега молекул в падающем на поверхность потоке.

В скачке уплотнения происходит значительное увеличение плотности и температуры молекулярного газа, так как в процессе взаимодействия сверхзвукового потока с поверхностью поток сжимается в направлении движения, и кинетическая энергия направленного движения потока посредством столкновений переходит в энергию беспорядочного поступательного движения. При этом установление равновесного распределения энергии между поступательным и вращательным молекулярным движением происходит очень быстро, а между поступательным и вращательным с одной стороны, и колебательным, с другой, - гораздо медленнее. Поэтому в скачке уплотнения вращательные и поступательные степени свободы молекул могут разогреваться очень сильно, в то время как колебательные увеличиваются незначительно. Таким образом, в скачке уплотнения реализуются новые неравновесные условия, выраженные соотношением

$$T_{2,п} \geq T_{2,вр} > T_{2,кол} . \quad (2)$$

Поместив поверхность (использовались пластинки из кристаллов  $\text{KBr}$ ,  $\text{CaF}_2$ , и  $\text{LiF}$ , которые пропускали  $\text{HF}^*$  люминесценцию) в область распространения

молекулярного потока, мы получили две дополнительные возможности возбуждения молекул лазерным излучением: 1) в падающем на поверхность потоке во время, когда перед поверхностью ещё не сформировался скачок уплотнения и 2) в более поздний момент времени – в скачке уплотнения.

На рис. 2 приведена осциллограмма импульса  $\text{HF}^*$  люминесценции, которая наблюдалась при возбуждении молекул  $\text{SF}_6$  в смеси с  $\text{CH}_4$  в потоке, взаимодействующем с поверхностью. Расстояние от зоны возбуждения до поверхности  $\Delta x = 68$  мм. Молекулы облучались на частоте  $947,74 \text{ см}^{-1}$ , резонансной с колебанием  $\nu_3$   $\text{SF}_6$  ( $\nu_3 \approx 948 \text{ см}^{-1}$ ).

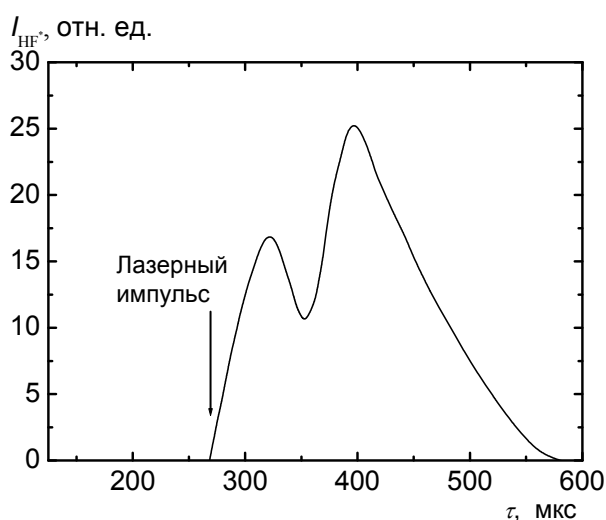


Рис. 2. Осциллограмма импульса  $\text{HF}^*$  люминесценции при возбуждении  $\text{SF}_6$  в смеси с  $\text{CH}_4$  в потоке, взаимодействующем с поверхностью

На рис. 2 видно, что импульс люминесценции  $\text{HF}^*$  состоит из двух пиков. Первый пик обусловлен диссоциацией молекул в падающем на твёрдую поверхность потоке, а второй связан с диссоциацией молекул  $\text{SF}_6$ , отражённых от поверхности. При расстоянии  $\Delta x \leq 10$  мм эти пики не разрешались во времени из-за узкой полосы пропускания ИК - приёмника (около 16 кГц), и импульс  $\text{HF}^*$  люминесценции состоял из одного пика, амплитуда которого пропорциональна выходу продуктов диссоциации молекул  $\text{SF}_6$ .

Для того чтобы проследить процесс формирования скачка уплотнения во времени, нами была измерена зависимость интенсивности  $\text{HF}^*$  люминесценции от времени задержки между импульсом сопла и лазерным импульсом в случае, когда сверхзвуковой поток взаимодействует с поверхностью, а также когда на пути потока нет поверхности.

На рис. 3 приведены характерные зависимости интенсивности люминесценции  $\text{HF}^*$  от времени задержки  $\tau_3$  в случае облучения  $\text{SF}_6$  в смеси с  $\text{CH}_4$  ( $\text{SF}_6:\text{CH}_4=1:1$ ) в невозмущённом потоке (кривая 1) и в потоке, взаимодействующем с поверхностью

(кривая 2). Поверхность располагалась на расстоянии 51 мм от сопла. Расстояние от зоны возбуждения до поверхности составляло  $\Delta x = 2,5$  мм.

На рис. 3 видно, что возбуждение молекул в скачке уплотнения приводит к значительному увеличению (более чем на порядок) интенсивности люминесценции  $\text{HF}^*$  по сравнению со случаем возбуждения молекул в невозмущённом потоке. Эта зависимость имеет отчётливо выраженный максимум при  $\tau_3 = 310$  мкс с очень крутым фронтом, что, как правило, характерно для ударной волны.

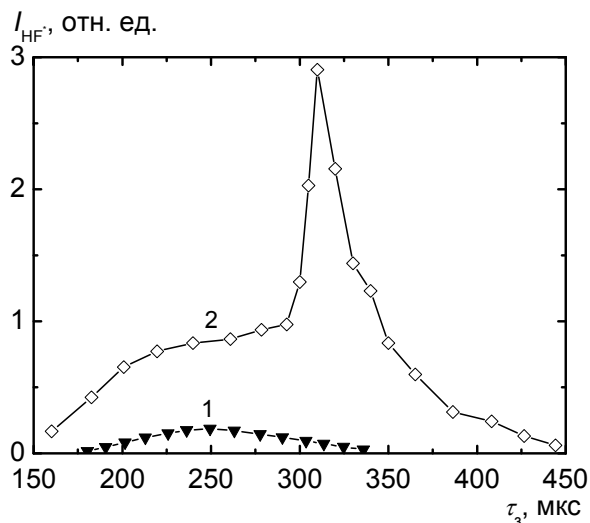


Рис. 3. Зависимости интенсивности  $\text{HF}^*$  люминесценции от времени задержки  $\tau_3$  между импульсом сопла и импульсом излучения лазера в случае возбуждения  $\text{SF}_6$  в невозмущённом потоке (кривая 1) и в потоке, взаимодействующем с поверхностью (кривая 2).

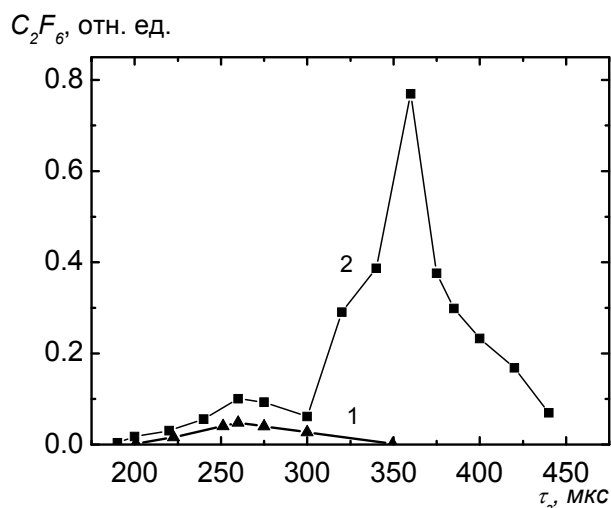


Рис. 4. Зависимости выхода  $\text{C}_2\text{F}_6$  от времени задержки  $\tau_3$  в случае возбуждения  $\text{CF}_3\text{I}$  в невозмущённом потоке (кривая 1) и потоке, взаимодействующем с поверхностью (кривая 2).

Аналогичные зависимости были получены и для молекулы  $\text{CF}_3\text{I}$ . Так, на рис. 4 показаны зависимости выхода продукта  $\text{C}_2\text{F}_6$  от времени задержки  $\tau_3$  между импульсом открывания сопла и импульсом  $\text{CO}_2$ -лазера.

Результаты, приведённые выше, показывают, что в случае возбуждения  $\text{SF}_6$  и  $\text{CF}_3\text{I}$  в скачке уплотнения имеет место значительное увеличение выхода продуктов многофотонной диссоциации (более чем на порядок) по сравнению со случаем возбуждения молекул в невозмущённом потоке. Такое существенное увеличение выхода продуктов можно объяснить следующим образом. Многофотонное возбуждение создаёт ансамбль высоковозбуждённых молекул с достаточно широким распределением по колебательным состояниям [22]. Часть молекул, поглотив достаточное количество ИК квантов, диссоциирует радиационно без участия столкновений, другая часть молекул, возбуждённых ниже границы диссоциации – с участием столкновений. В невозмущённом потоке молекулы диссоциируют только радиационно. В скачке же уплотнения увеличение (более чем на порядок) выхода продуктов диссоциации по сравнению с возбуждением в невозмущённом сверхзвуковом потоке происходит в результате одновременного действия нескольких факторов:

- 1) увеличения плотности газа;
- 2) увеличения скорости химических реакций за счёт увеличения температуры газа в скачке уплотнения;
- 3) увеличения вклада столкновительной диссоциации молекул, возбуждённых ИК импульсом ниже границы диссоциации.

Для того чтобы оценить величину фронта скачка уплотнения, мы измерили зависимости интенсивности  $\text{HF}^*$  люминесценции и выхода продукта  $\text{C}_2\text{F}_6$  от расстояния  $\Delta x$  при давлении газов  $\text{SF}_6$  и  $\text{CF}_3\text{I}$  над соплом 1,5 и 1,25 атм. соответственно. Эти зависимости показаны на рис. 5 и рис. 6. На приведённых зависимостях видно, что величина фронта скачка уплотнения составляет примерно 3 мм для  $\text{SF}_6$  и 3,5 мм для  $\text{CF}_3\text{I}$ . Предельную плотность газа и среднюю концентрацию молекул в скачке уплотнения можно оценить, используя параметры сверхзвукового молекулярного потока. В качестве такой достаточно грубой оценки отношение  $\rho_2/\rho_1$  можно считать равным отношению протяжённости,  $\Delta x_n$  то есть

$$\rho_2/\rho_1 \approx \frac{\Delta x_n}{\Delta x_\phi}, \quad (3)$$

где  $\rho_2$  и  $\rho_1$  — плотности газа в скачке уплотнения и в падающем потоке соответственно. Для молекулярного потока  $\text{SF}_6$  ( $\Delta x_n \approx 4,2$  см в зоне возбуждения, на

расстоянии 50 мм от сопла  $\Delta x_\phi \approx 3$  мм) с помощью соотношения (3) получим  $\rho_2/\rho_1 \approx 14$ . При давлении SF<sub>6</sub> над соплом 1,25 атм полное число и концентрация молекул в потоке составляли  $N_n \approx 4,2 \times 10^{16}$  и  $N_1 \approx 1,4 \times 10^{15}$  см<sup>-3</sup>, соответственно. Следовательно, средняя концентрация молекул SF<sub>6</sub> в скачке уплотнения составила  $N_2 \approx 2 \times 10^{16}$  см<sup>-3</sup>.

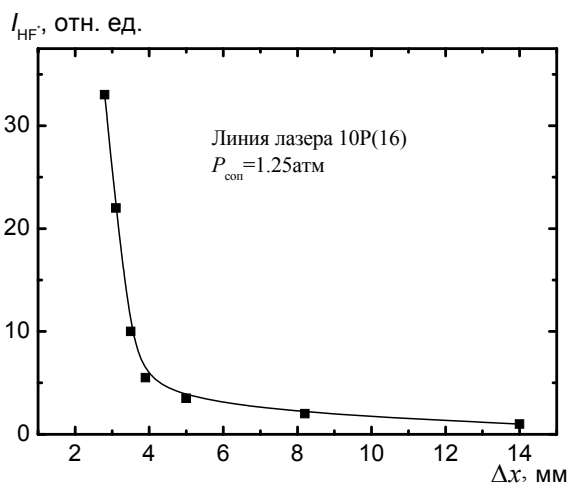


Рис. 5. Зависимость интенсивности HF\* люминесценции от расстояния  $\Delta x$  при возбуждении молекул в скачке уплотнения

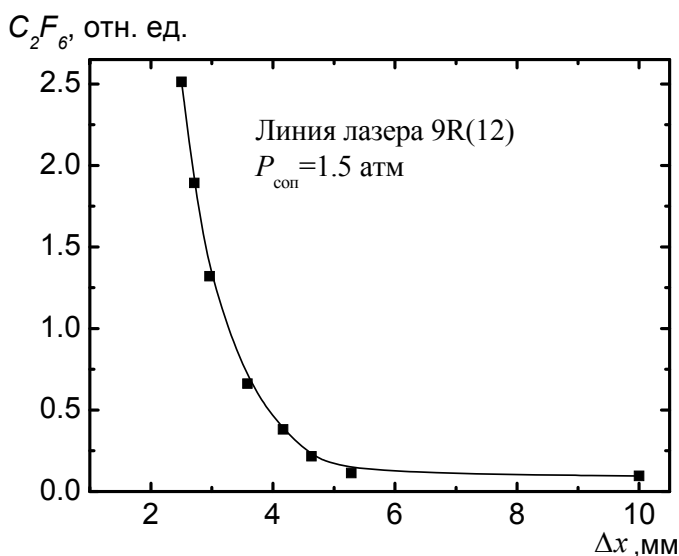


Рис. 6. Зависимость выхода C<sub>2</sub>F<sub>6</sub> от расстояния  $\Delta x$  в случае возбуждения CF<sub>3</sub>I в скачке уплотнения.

В случае потока газа из молекул CF<sub>3</sub>I с помощью соотношения (3) получаем  $\rho_2/\rho_1 \approx 11$ . При давлении CF<sub>3</sub>I над соплом 1,5 атм полное число и концентрация молекул в потоке составляли  $N_n \approx 5,2 \times 10^{16}$  и  $N_1 \approx 1,7 \times 10^{15}$  см<sup>-3</sup>. Следовательно, средняя концентрация молекул в скачке уплотнения равнялась  $N_2 \approx 1,9 \times 10^{16}$  см<sup>-3</sup>. Увеличение поступательной и вращательной температур молекул SF<sub>6</sub> и CF<sub>3</sub>I в скачке уплотнения можно оценить из закона сохранения энергии:

$$\frac{mV_1^2}{2} = 3k\Delta T, \quad (4)$$

где  $V$  - скорость сверхзвукового молекулярного потока, а  $\Delta T$  - увеличение температуры в скачке уплотнения. Из соотношения (4) следует, что температура поступательных и вращательных степеней свободы молекул  $\text{SF}_6$  в скачке уплотнения увеличилась на величину  $\Delta T \approx 530$  К. С учётом такого приращения вращательная и поступательная температуры молекул в скачке уплотнения составляли примерно  $T_{2,\text{п}} \approx T_{2,\text{вр}} \approx (T_{1,\text{п}} + \Delta T) \approx 570$  К. Колебательная же температура молекул  $\text{SF}_6$  в скачке уплотнения осталась примерно равной колебательной температуре в невозмущённом потоке  $T_{2,\text{кол}} \approx T_{1,\text{кол}} \leq 150$  К.

Для молекулярного потока газа  $\text{CF}_3\text{I}$  ( $V_1 \approx 400$  м/с) в скачке уплотнения с помощью соотношения (4) получаем значения поступательной и вращательной температур:  $T_{2,\text{п}} \approx T_{2,\text{вр}} \approx 620$  К. Колебательная же температура молекул  $\text{CF}_3\text{I}$  в скачке уплотнения, по видимому, осталась без изменения  $T_{2,\text{кол}} \approx T_{1,\text{кол}} \leq 150$  К.

**Глава 3** посвящена исследованию спектральных характеристик многофотонной ИК диссоциации молекул  $\text{SF}_6$  и  $\text{CF}_3\text{I}$ . Эти характеристики интересны, прежде всего, в случае применения ИК МФД для лазерного разделения изотопов. Дело в том, что ими определяется такой важный параметр разделения как изотопическая селективность [2]. Изотопическая селективность МФД в лазерной физике определяется как отношение выходов диссоциации молекул с различным изотопным составом ( $i$  и  $k$  изотопами)  $\alpha(i/k) = \frac{\beta_i}{\beta_k}$  [2].

На рис. 7 представлены зависимости интенсивности люминесценции  $\text{HF}^*$  от частоты лазерного излучения при облучении  $\text{SF}_6$  в смеси с метаном ( $P_{\text{SF}_6}/P_{\text{CH}_4}=1/1$ ) в невозмущённом потоке (кривая 1), в падающем на поверхность потоке (кривая 2), и в скачке уплотнения (кривая 3). Плотность энергии возбуждающего лазерного излучения составляла  $\Phi \approx 5$  Дж/см<sup>2</sup>, а суммарное давление газа над соплом - 2,4 атм. Молекулы возбуждались на расстоянии  $\Delta x \approx 2,5$  мм от поверхности.

На рис. 7 видно, что отношения интенсивностей в максимумах и низкочастотных крыльях (вблизи полосы поглощения колебания  $\nu_3$  молекул  $^{34}\text{SF}_6 \approx 930,5$  см<sup>-1</sup> [23]) для всех трёх спектров не различаются сильно. Поэтому можно предположить, что и селективности диссоциации молекул  $^{34}\text{SF}_6$  во всех этих случаях также не должны различаться сильно. Мы измерили выход продукта  $\text{SF}_4$  и оценили коэффициент его обогащения изотопом  $^{34}\text{S}$  (селективность) для случаев возбуждения молекул в невозмущённом потоке, в падающем на поверхность потоке и в скачке уплотнения. Молекулы облучались на частоте 929 см<sup>-1</sup> (линия 10P(36), резонансная с колебанием  $\nu_3$  молекулы  $^{34}\text{SF}_6$ ).

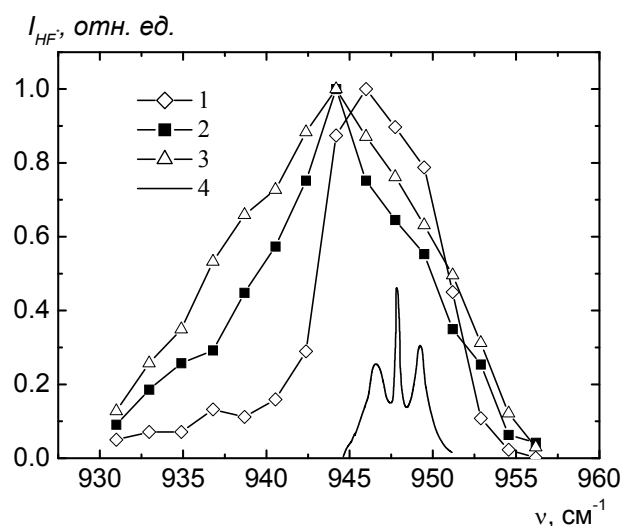


Рис. 7. Зависимости интенсивности HF\* люминесценции от частоты лазерного излучения в случае возбуждения SF<sub>6</sub> в невозмущённом потоке (кривая 1), в потоке, падающем на поверхность (кривая 2) и в скачке уплотнения (кривая 3). Спектр линейного поглощения колебания ν<sub>3</sub> SF<sub>6</sub>, измеренный в газодинамически охлаждённом потоке при T ≈ 55 К (кривая 4) [24].

Коэффициент обогащения продукта SF<sub>4</sub> изотопом <sup>34</sup>S определялся как

$$K_{34}^{prod} = \frac{{}^{34}SF_4}{{}^{\zeta}{}^{32}SF_4}, \quad (5)$$

где  $\frac{{}^{34}SF_4}{{}^{32}SF_4}$  - отношение концентраций в продукте SF<sub>4</sub>,  $\zeta = \frac{{}^{34}S}{{}^{32}S} \approx 0,045$  -

отношение процентных содержаний изотопов серы в исходном газе SF<sub>6</sub>.

Нами также был измерен выход SF<sub>4</sub> в случае возбуждения молекул SF<sub>6</sub> на линии 10P(16) CO<sub>2</sub>-лазера в невозмущённом потоке и в потоке, взаимодействующем с поверхностью. Мы обнаружили, что выход SF<sub>4</sub> в случае возбуждения молекул в потоке, падающем на поверхность, был примерно в 2,5 раза, а в скачке уплотнения в 12 раз больше, чем в невозмущённом потоке. Результаты исследований приведены в таблице 1.

**Таблица 1.** Результаты исследований выхода продукта SF<sub>4</sub> и коэффициента обогащения его изотопом <sup>34</sup>S при диссоциации молекул SF<sub>6</sub> в невозмущённом потоке и в потоке, взаимодействующем с поверхностью.

$P_{\text{сop}}$ атм.	Линия CO <sub>2</sub> - лазера	$\Phi_{\text{cp}}$ , Дж/см <sup>2</sup>	Невозмущённый поток	Падающий поток	Скачок уплотнения
1,25	10P16	12	Выход SF <sub>4</sub> , отн. ед.		
			1,0 ± 0,2	2,5 ± 0,5	12 ± 3
1,25	10P36	10	Коэффициент обогащения $K_{34}^{\text{prod}}$ в SF <sub>4</sub> .		
			17 ± 5	15 ± 3	14 ± 3

Мы также измерили зависимости выхода продукта C<sub>2</sub>F<sub>6</sub> от частоты излучения CO<sub>2</sub>-лазера в случаях возбуждения молекул CF<sub>3</sub>I в невозмущённом потоке и в скачке уплотнения. Такие частотные зависимости приведены на рис. 8

На рис. 8 видно, что выход C<sub>2</sub>F<sub>6</sub> при облучении CF<sub>3</sub>I в скачке уплотнения на всех частотах значительно больше, чем в случае возбуждения молекул в невозмущённом потоке. Так, при возбуждении молекул CF<sub>3</sub>I в скачке уплотнения на линиях излучения CO<sub>2</sub>-лазера 9R(10) и 9R(12) выход продукта C<sub>2</sub>F<sub>6</sub> в 12-15 раз больше, чем в невозмущённом потоке. В области же длинных волн (на линии 9P(20)), там, где расположена полоса поглощения <sup>13</sup>CF<sub>3</sub>I, выход продуктов диссоциации более чем в 200 раз больше.

Такое различие выходов C<sub>2</sub>F<sub>6</sub> при облучении молекул в длинноволновой области спектра можно объяснить одновременным действием нескольких факторов:

1) очень сильной зависимостью выхода продукта C<sub>2</sub>F<sub>6</sub> от концентрации молекул CF<sub>3</sub>I из-за образования продукта C<sub>2</sub>F<sub>6</sub> за счёт парных столкновений радикалов CF<sub>3</sub> [25];

2) более высокой вращательной температурой CF<sub>3</sub>I в скачке уплотнения по сравнению с вращательной температурой в невозмущённом потоке.

Был также измерен выход продукта C<sub>2</sub>F<sub>6</sub> и определён коэффициент обогащения в нём изотопом <sup>13</sup>C (селективность) при облучении молекул CF<sub>3</sub>I в потоке, взаимодействующем с поверхностью и в невозмущённом потоке. Изотопный состав C<sub>2</sub>F<sub>6</sub> определялся масс-спектрометрически по ионному осколку C<sub>2</sub>F<sub>5</sub><sup>+</sup>, а коэффициент его обогащения изотопом <sup>13</sup>C, как

$$K_{13}^{\text{prod}} = \frac{2I_{121} + I_{120}}{(I_{120} + 2I_{119})\zeta}, \quad (6)$$



где  $I_{119}, I_{120}, I_{121}$  - интенсивности масс-пиков иона  $C_2F_5^+$ ,  $\zeta$  -  $^{13}C/^{12}C \approx 0,011$ -отношение процентных содержаний изотопов углерода в исходном газе  $CF_3I$ . Рассчитанные значения селективности и выхода продукта  $C_2F_6$  представлены в таблице 2.

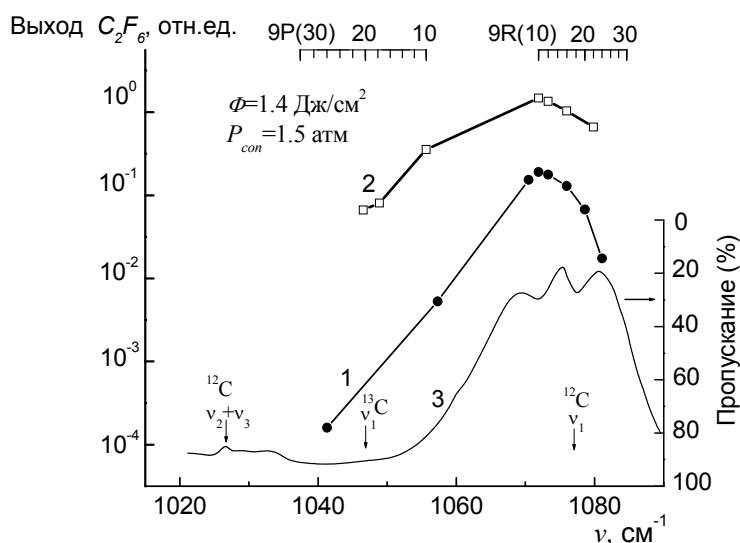


Рис. 8. Зависимость выхода  $C_2F_6$  от частоты лазерного излучения в случае возбуждения  $CF_3I$  в невозмущённом потоке (кривая 1) и в скачке уплотнения (кривая 2), а также спектр линейного поглощения  $CF_3I$  (кривая 3).

**Таблица 2.** Выход продукта  $C_2F_6$  и коэффициент его обогащения изотопом  $^{13}C$  при диссоциации  $CF_3I$  в невозмущённом потоке и в потоке, взаимодействующем с поверхностью. Давление  $CF_3I$  над соплом 1,5 атм, плотность энергии 1,5 Дж/см<sup>2</sup>.

Линия CO <sub>2</sub> - лазера	Выход $C_2F_6$ , отн. ед.			Коэффициент обогащения $K_{13}^{prod}$ в $C_2F_6$		
	Невозм. поток	Падающий поток	Скачок уплотн.	Невоз. поток	Падающий поток	Скачок уплотн.
9R(12)	$1 \pm 0,2$	$2,5 \pm 0,5$	$14 \pm 3$			
9P(20)				$21 \pm 3$	$19 \pm 3$	$15 \pm 3$

Видно, что выход продукта  $C_2F_6$  в скачке уплотнения более чем на порядок больше по сравнению с выходом в невозмущённом потоке, в то время как изотопическая селективность падает примерно на 25 %.

В главе также описываются эксперименты, целью которых было выяснение роли вращательной и колебательной температур молекул SF<sub>6</sub> в формировании изотопической селективности многофотонной диссоциации.

**В Заключение** представлены основные результаты и выводы диссертации:

1. Впервые реализована изотопически-селективная ИК МФД молекул в новых термодинамически неравновесных условиях ( $T_{2,п} \geq T_{2,вр} > T_{2,кол}$ ), обратных неравновесным условиям, реализуемым в сверхзвуковых струях и потоках ( $T_{1,п} \leq T_{1,вр} < T_{1,кол}$ ).

2. Получены спектральные и энергетические характеристики ИК МФД молекул SF<sub>6</sub> и CF<sub>3</sub>I, а также измерены селективности в продуктах SF<sub>4</sub> и C<sub>2</sub>F<sub>6</sub> при возбуждении молекул в неравновесных условиях: невозмущённого молекулярного потока и потока, взаимодействующего с поверхностью.

3. Установлено, что при возбуждении молекул SF<sub>6</sub> и CF<sub>3</sub>I в скачке уплотнения выход продуктов более чем на порядок больше по сравнению со случаем, когда эти молекулы возбуждаются в невозмущённом потоке. При этом селективность ИК МФД уменьшается примерно на 25 %.

4. На основании полученных спектральных характеристик ИК МФД SF<sub>6</sub> и выполненных оценок вращательной и колебательной температуры молекул в скачке уплотнения сделан вывод о доминирующей роли колебательной температуры в формировании изотопической селективности процесса ИК многофотонной диссоциации SF<sub>6</sub>.

#### **Публикации автора по теме диссертации**

Публикации в рецензируемых журналах:

1. Г.Н. Макаров, А.Н. Петин. Индуцированная ТЕА СО<sub>2</sub>-лазером селективная диссоциация молекул в холодной ударной волне // Письма в ЖЭТФ. – 2000. – Т. 71. вып. 10 – С. 583-587.

2. G.N. Makarov, A.N. Petin. TEA CO<sub>2</sub> laser-induced isotopically selective dissociation of SF<sub>6</sub> in a cold shock wave // Chem. Phys. Lett. – 2000. – V. 323. –I. 3-4 – P. 345-350.

3. Г.Н. Макаров, А.Н. Петин. Эффективность селективной ИК многофотонной диссоциации молекул в импульсном газодинамическом потоке, взаимодействующем с поверхностью // Квантовая электроника. – 2000. – Т.– 30. №. 8. – С 738-740.

4. Г.Н. Макаров, А.Н. Петин. Селективная диссоциация SF<sub>6</sub> интенсивным излучением СО<sub>2</sub>-лазера в импульсном газодинамическом потоке // Хим. высоких энергий. – 2000.Т. – 34. – № 6. – С. 440-445.

5. Г.Н. Макаров, А.Н. Петин. Селективная многофотонная ИК диссоциация молекул SF<sub>6</sub> в неравновесных условиях импульсного газодинамически охлаждённого молекулярного потока, взаимодействующего с твёрдой поверхностью // ЖЭТФ. – 2001. – Т. – 119. – вып. 1. – С. 5-15.

6. G.N. Makarov, A.N. Petin. Isotopically selective IR multiphoton dissociation of SF<sub>6</sub> in a pulsed gas dynamic flow interacting with solid surface // Chem. Phys. – 2001. – V. 266. – I. 1. – P. 125-134.

7. В.М. Апатин, В.Н. Лохман, Г.Н. Макаров, Д.Д. Огурок, А.Н. Петин. Спектральные характеристики многофотонной ИК диссоциации SF<sub>6</sub> в неравновесных условиях скачка уплотнения // Оптика и спектроскопия. – 2001. – Т. 91. – № 6 – С. 910-916.

8. Г.Н. Макаров, С.А. Мочалов, А.Н. Петин. Селективная ИК многофотонная диссоциация CF<sub>3</sub>I в неравновесных условиях скачка уплотнения // Квантовая электроника. – 2001. – Т. 31. – № 3. – С. 263-267

9. Г.Н. Макаров, А.Н. Петин. Многофотонная ИК-диссоциация SF<sub>6</sub> в колебательно-охлаждённом скачке уплотнения // Химия высоких энергий. – 2002. – Т. 36. – № 6. – С. 472-476.

Тезисы конференции:

10. Г.Н. Макаров, А.Н. Петин. Изотопически селективная ИК многофотонная диссоциация молекул SF<sub>6</sub> в импульсном газодинамическом потоке, взаимодействующем с твёрдой поверхностью // Физико-химические процессы при селекции атомов и молекул. 6-я Всероссийская (международная) конференция, Звенигород, 1-5 октября 2001 года.

### Литература

1. Изотопы: свойства, получение, применение. Т. 1. Под ред. В.Ю. Баранова. – Москва: –Физматлит. – 2005.

2. В.С. Летохов. Нелинейные селективные фотопроцессы в атомах и молекулах. – Москва: –Наука. – 1983.

3. Р.В. Амбарцумян, Б.И. Васильев, А.З. Грасюк, А.П. Дядькин, В.С. Летохов, Н.П. Фурзиков. Изотопически-селективная диссоциация молекул CCl<sub>4</sub> излучением мощного NH<sub>3</sub>-лазера // Квантовая электроника. – 1978. –Т. 5. – № 8 – С. 1791-1795.

4. E. Ronalder, H.J. Strydom, L.R. Botha. High-pressure continuously tunable CO<sub>2</sub> lasers and molecular laser isotope separation // Pramana-J. Phys. – 2014. – V. 82. – № 1. –P. 49-58.

5. S. Kato, S. Satooka, T. Oyama. Uranium isotope separation by 16 μm infrared laser irradiation of UF<sub>6</sub> in supersonic nozzle // Intern. Symp. Advanced nuclear energy research. Near future chemistry in nuclear field. – Tokyo. – 1989.

6. J.L. Lyman, B.E. Newman, T. Noda, H. Suzuki. Enrichment of silicon isotopes with infrared free-electron laser radiation // *Journal of physical chemistry A*. – 1999. – V. 103. – № 21. – P. 4227-4232.
7. J.L. Lyman, B.E. Newman, T. Noda, H. Suzuki. Isotope separation of silicon and molybdenum using a free electron laser // *Journal of nuclear materials. Part: A*. – 2002 –V. 307. – P. 715-718.
8. Г.Н. Макаров. Селективные процессы ИК-возбуждения и диссоциации молекул в газодинамически охлаждённых струях и потоках // *Успехи физических наук*. – 2005. – Т. 175.– № 1 . – С. 41-83.
9. В.М. Апатин, Г.Н. Макаров. Многофотонное поглощение ИК лазерного излучения молекулами SF<sub>6</sub>, охлаждёнными в сверхзвуковой струе // *ЖЭТФ*. – 1983. – Т. 84. – вып. 1. – С. 15-28.
10. V.M. Apatin, G.N. Makarov. The characteristics of multiple-photon absorption of SF<sub>6</sub> molecules cooled in free jet expansion from a pulsed supersonic nozzle // *Appl. Phys.* 1982. V. 28. № 2. P. 367-372.
11. В.М. Апатин, Г.Н. Макаров. Многофотонное поглощение ИК поглощение в молекулах CF<sub>3</sub>I, охлаждённых в импульсной струе // *Квантовая электроника*. – 1983. – Т. 10. – № 7. – С. 1435-1441.
12. J.M Zellweger, J.M. Philippoz, P.Melinon, R. Monot, N. van den Bergh. Isotopically selective condensation and infrared-laser - assisted gas dynamic isotope separation // *Physical review letters*. – 1984. – V. 52. – № 7 – P. 522-525.
13. J.W. Eerkens, Jaewoo Kim. Isotope separation by selective laser-assisted repression of condensation in supersonic free jets // *AICCh Journal* – 2010. – V. 56. – № 9. – P. 2331-2337.
14. Г.Н. Макаров, А.Н. Петин. Индуцированное мощным ИК лазером увеличение вероятности прохождения молекул через охлаждённую многоканальную пластинку // *Письма в ЖЭТФ*. – 2006. – Т. 83. – вып. 3. – С. 115-119.
15. Г.Н. Макаров, А.Н. Петин. Взаимодействие интенсивных пучков колебательно-высоковозбуждённых молекул с конденсированными на холодной поверхности молекулами кластерами // *ЖЭТФ*. – 2006. – Т. 130. – вып. 5(11). – С. 804-815.
16. Г.Н. Макаров, А.Н. Петин. Лазерное управление процессом захвата молекул – хромофоров нанокластерами благородных газов в пересекающихся молекулярном и кластерном пучках // *Письма в ЖЭТФ*. – 2011. – Т. 93. – вып. 3. – С. 123-128.
17. V.M. Apatin, V.M. Krivtsun, Yu.A. Kuritsyn, G. N. Makarov, I. Pak. Diod laser study of IR multiphoton-induced depletion of rotational sublevels of the ground vibrational state of SF<sub>6</sub> molecules cooled in a pulsed free jet // *Opt. Comm.* – 1983. – V. 47. – I. 4. – P. 251-256.

18. В.М. Апатин, В.Н. Лохман, Г.Н. Макаров, Д.Д. Огурок, А.Н. Петин. Спектральные характеристики многофотонной ИК диссоциации SF<sub>6</sub> в неравновесных условиях скачка уплотнения // Оптика и спектроскопия. –2001. – Т. 91. –№ 6 – С. 910-916
19. Г.Н. Макаров, В.Н. Лохман, Д.Е. Малиновский, Д.Д. Огурок. Изотопически-селективная ИК многофотонная диссоциация CF<sub>3</sub>I в импульсном газодинамическом потоке // Квантовая электроника. – 1998. – Т. 25. – № 6. – С. 545-549.
20. G.N. Makarov, D.E. Malinovsky, D.D. Ogurok. Single pulse carbon-13 enrichment of CF<sub>3</sub>I under IR MPD in a short gas dynamic flow // Las. Chem. – 1998. – V. 17. – P. 205-218.
21. Л.Д. Ландау, Е.М. Лившиц. Гидродинамика: – Москва. –Наука. – 1986. 736 С
22. V.N. Bagratashvili, V.S. Letokhov, A.A. Makarov, E.A. Ryabov. Multiple photon infrared laser photophysics and photochemistry, NY: Academic Press. – 1985. 512 P.
23. G. Baldacchini, S. Marchetti, V. Montelatici. Diod laser spectrum of the  $\nu_3$  band of <sup>34</sup>SF<sub>6</sub> // J. Mol. Spectr. – 1982. – V. 91. – № 1 – P. 80-86.
24. R.J. Jensen, J.G. Marinuzzi, C.P. Robinson, C.D. Rockwood. Prospects for uranium enrichment // Laser Focus. – 1976. – V. 12. – № 6 – P. 51-63.
25. Г.Н. Макаров. Селективная ИК многофотонная диссоциация CF<sub>3</sub>I в импульсном газодинамическом потоке. Зависимость фактора обогащения в продукте C<sub>2</sub>F<sub>6</sub> изотопом <sup>13</sup>C от концентрации молекул в потоке. // Письма в ЖТФ. – 1998. – Т. 24. – вып. 23. – С. 35-41.