

ИК многофотонное возбуждение молекул SF₆, сублимирующих с поверхности наночастиц (CO₂)_N в кластерном пучке

Г.Н.Макаров, А.Н.Петин

Изучено ИК многофотонное возбуждение молекул SF₆, сублимирующих с поверхности ван-дер-ваальсовых кластеров (наночастиц) (CO₂)_N в кластерном пучке ($N \geq 10^2$ – число мономеров в кластере). Молекулы SF₆ захватываются кластерами в пересекающихся кластерном и молекулярном пучках и через определенное время сублимируют с их поверхности, неся информацию о скорости и температуре (внутренней энергии) кластеров. Показано, что спектры многофотонного поглощения молекул SF₆, сублимирующих с поверхности кластеров, значительно уже аналогичных спектров молекул SF₆ в исходном газодинамически охлажденном молекулярном пучке, что указывает на более низкую колебательную температуру молекул, сублимирующих с поверхности кластеров. Следовательно, с помощью предложенного метода можно получать сильно колебательно-охлажденные молекулы, представляющие интерес для ряда приложений, в частности для реализации высокоселективных процессов ИК многофотонного возбуждения и изотопно-селективной диссоциации молекул.

Ключевые слова: молекулы, кластеры, наночастицы, молекулярные и кластерные пучки, ИК многофотонное возбуждение и диссоциация молекул, спектры ИК многофотонного поглощения, лазерное разделение изотопов.

1. Введение

В настоящее время большое внимание уделяется исследованиям кластеров и наночастиц [1–7]. (Отметим, что кластеры с числом частиц $N \geq 10^2$ и наночастицы представляют собой одни и те же агрегаты.) Это обусловлено их уникальными свойствами, позволяющими применять их в нанотехнологии для изготовления миниатюрных быстродействующих электронных устройств и систем с большой памятью, для нанесения тонких пленок, получения новых материалов и обработки поверхности [1–5]. Кроме того, большой интерес к металлическим и композитным кластерам и наночастицам связан с возможностью их использования в качестве новых высокотемпературных сверхпроводников [6, 8, 9]. Все это предполагает знание физических, химических и термодинамических свойств данных агрегатов, в том числе такого важного параметра, как их температура (внутренняя энергия), поскольку от нее зависят многие свойства частиц и характер процессов с их участием (см., напр., обзор [7] и приведенные в нем ссылки).

Недавно в работе [10] нами было показано, что молекулы SF₆, захваченные большими ван-дер-ваальсовыми кластерами (наночастицами) (CO₂)_N в пересекающихся кластерном и молекулярном пучках, через определенное время сублимируют (испаряются) с поверхности класте-

ров, неся информацию о скорости и температуре (внутренней энергии) кластеров. На основе спектров многофотонного поглощения (МФП) молекул SF₆, сублимирующих с поверхности кластеров, мы оценили температуру наночастиц (CO₂)_N в кластерном пучке ($T_{cl} < 150$ K) [10]. В то же время исследование ИК многофотонного возбуждения МФВ молекул, сублимирующих с поверхности холодных кластеров, представляет самостоятельный интерес в связи с тем, что указанным методом можно получать сильно колебательно-охлажденные молекулы, необходимые, например, для лазерного разделения изотопов методом селективной ИК многофотонной диссоциации молекул. Дело в том, что получение таких молекул, характеризующихся колебательной температурой $E_{vib} \leq 150$ K, проблематично даже в газодинамически охлажденных струях и потоках [11–13], особенно в случае молекул с большой теплоемкостью (SF₆, WF₆, UF₆). В то же время для реализации высокой селективности возбуждения и диссоциации молекул при лазерном разделении изотопов крайне важным условием является именно глубокое колебательное охлаждение молекул [14, 15].

В настоящей работе нами подробно изучены спектральные и энергетические характеристики ИК многофотонного возбуждения молекул SF₆, сублимирующих с поверхности наночастиц (CO₂)_N в кластерном пучке. Установлено, что спектры МФП таких молекул значительно уже спектров МФП SF₆ в исходном газодинамически охлажденном молекулярном пучке, что указывает на более низкую колебательную температуру молекул в первом случае. Полученные результаты представляют интерес для реализации изотопно-селективных процессов ИК многофотонного возбуждения и диссоциации молекул, а также для исследования ряда других атомно-молекулярных процессов, в которых колебательная температура молекул играет важную роль (например, химических ре-

Г.Н.Макаров. Институт спектроскопии РАН, Россия, Московская обл., 142190 Троицк, ул. Физическая, 5; e-mail: gmakarov@isan.troitsk.ru

А.Н.Петин. Институт спектроскопии РАН, Россия, Московская обл., 142190 Троицк, ул. Физическая, 5; ФГУП «ГНЦ РФ – Троицкий институт инновационных и термоядерных исследований», Россия, Московская обл., 142190 Троицк

Поступила в редакцию 12 мая 2009 г.

акций, процессов осаждения молекул на холодную поверхность, в том числе на поверхность кластеров) [7, 10, 16, 17].

2. Экспериментальная установка и методика измерений

Схема экспериментальной установки показана на рис. 1. Интенсивный импульсный кластерный пучок (CO₂)_N пересекался под прямым углом с импульсным молекулярным пучком SF₆; в зоне их пересечения происходил захват молекул SF₆ кластерами (CO₂)_N. При этом молекулы передавали кластерам импульс [18–20], в результате чего кластеры отклонялись на некоторый угол θ . Для получения кластерного пучка использовалось импульсное сопло типа токовой петли [21] с диаметром отверстия 0.75 мм. В зависимости от состава и давления газа над соплом время его нахождения в открытом состоянии составляло $\sim 100 - 120$ мкс (по полувысоте). Давление газа над соплом изменялось от ~ 0.5 до 4.5 атм. Срез сопла был выполнен в форме конуса длиной 30 мм с полным углом раствора 26°. Формирование кластерных пучков с помощью импульсного сопла подробно изучено в [22]. В условиях данных экспериментов генерировались кластеры (CO₂)_N с числом частиц $N \geq 10^2 - 10^3$. Отметим, что большие кластеры (CO₂)_N имеют кристаллическую структуру [7, 23].

Для получения молекулярного пучка SF₆ использовалось импульсное сопло (электромагнитный клапан) типа General Valve с диаметром отверстия 0.8 мм. Время нахождения сопла в открытом состоянии составляло 300 мкс по полувысоте, давление газа над ним изменялось от 0.5 до 2.5 атм.

Для выделения кластерного и молекулярного пучков из импульсных струй, генерируемых с помощью указанных сопел, использовались конусные диафрагмы («скиммеры») с диаметрами входных отверстий соответственно 3 и 6 мм, которые располагались от сопел на расстояниях 30 и 26 мм. Детектирование молекулярного и кластерного пучков производилось с помощью неохлаждаемых пироэлектрических приемников (ПЭП), имеющих временное разрешение 5–10 мкс [12, 14, 15]. Приемники могли устанавливаться на различных расстояниях от сопел. Расстояния от сопел до центра зоны пересечения пучков составляли для кластерного пучка 93 мм, для молекулярного – 90 мм. Вакуумная камера, в которой формировались пучки, откачивалась до давления $\sim 3 \times 10^{-6}$ Тор диффузионным насосом.

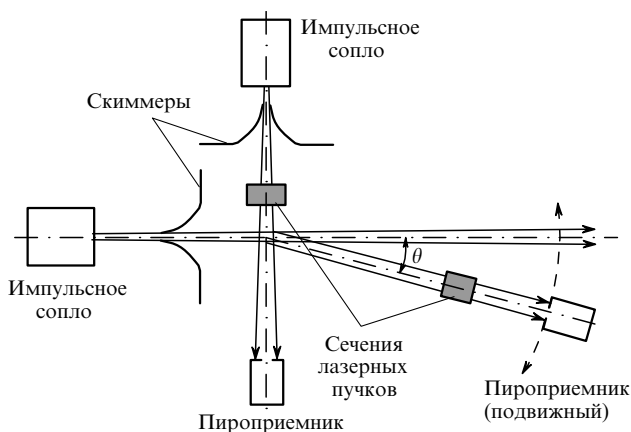


Рис. 1. Схема эксперимента.

В зоне пересечения кластерного и молекулярного пучков молекулы захватывались кластерами, а после термализации сублимировали с поверхности кластеров, неся информацию об их скорости и температуре. Кинетическая и внутренняя (квантовое состояние) энергии молекулы являются мерой кластерной температуры. В условиях, когда энергия связи мономеров в кластере больше энергии связи кластерной молекулы с молекулой-зондом, с поверхности кластера с большей вероятностью сублимируют захваченные, а не его собственные молекулы (атомы). Указанное условие выполняется для многих кластеров и молекул (атомов), и оно было реализовано в описываемых в данной работе экспериментах. Теплота (энергия) сублимации SF₆ (5.46 ккал/моль [24]) меньше теплоты сублимации CO₂ (6.03 ккал/моль [24]). Вероятность сублимации молекул с поверхности кластера при захвате молекул увеличивается, поскольку энергия захваченной молекулы передается кластеру, в результате чего его температура повышается [18–20].

Колебательное возбуждение молекул SF₆ осуществлялось перестраиваемым по частоте интенсивным (свыше $10^6 - 10^7$ Вт/см²) излучением импульсного CO₂-лазера. Энергия в импульсе не превышала 3 Дж. Импульс генерации состоял из пика длительностью по полувысоте около 100 нс и хвостовой части длительностью ~ 0.6 мкс, в которой содержалось примерно 50 % энергии. Возбуждалось активное в ИК области колебание ν_3 молекулы SF₆ (948 см^{-1} [25]). Лазерное излучение пересекало молекулярный пучок под прямым углом на расстоянии 75 мм от среза сопла (рис. 1). При исследовании ИК многофотонного поглощения молекул SF₆, сублимировавших с поверхности кластеров (CO₂)_N, молекулы возбуждались на расстоянии 23 мм от центра зоны пересечения кластерного пучка с молекулярным пучком. Размеры лазерного пятна в зоне возбуждения составляли $\sim 10 \times 10$ мм. Для исследования ИК многофотонного поглощения SF₆ в молекулярном пучке, а также молекул SF₆, сублимировавших с поверхности кластеров, использовался пироэлектрический метод детектирования поглощенной энергии [11, 12, 14, 15]. Сигнал, индуцированный на ПЭП кластерным пучком и сублимировавшими молекулами, усиливался ($\times 100$) и подавался на цифровой осциллограф Tektronix TDS-1002. Молекулярный и кластерный пучки работали в режиме одиночных импульсов. При измерениях сигнал с детектора усреднялся по 16 импульсам.

Угол отклонения кластеров при захвате молекул (рис. 1) определяется [26,27] соотношением

$$\tan \theta = \frac{\sin \alpha}{m_1 v_1 / m_2 v_2 + \cos \alpha}, \quad (1)$$

где m_1, m_2 и v_1, v_2 – массы и скорости кластеров и молекул соответственно; α – угол между кластерным и молекулярным пучками. В условиях эксперимента ($\alpha \approx 90^\circ$, $m_2 \approx 146$ а. е. м., $v_1 \approx 470$ м/с и $v_2 \approx 450$ м/с) при захвате одиночных молекул SF₆ кластеры (CO₂)_N с числом частиц $N = 100$ отклонялись на угол $\theta \approx 1.8^\circ$, а с $N = 1000$ – на угол $\theta \approx 0.18^\circ$.

Нами было обнаружено, что захваченные кластерами молекулы SF₆ через определенное время сублимируют с поверхности кластеров. Это было установлено по индуцированному колебательно-возбужденными молекулами SF₆ сигналу на приемнике, детектирующем кластерный пучок, а также по форме времяпролетных спектров

кластерного пучка $(\text{CO}_2)_N$, полученных в случае его взаимодействия с молекулярным пучком и в отсутствие этого взаимодействия. Сублимирующие с поверхности кластеров молекулы летят в лабораторной системе координат преимущественно в направлении кластерного пучка. В результате они индуцируют на детекторе дополнительный сигнал (см. рис.2,а, б).

Время жизни τ молекулы SF_6 на поверхности кластера $(\text{CO}_2)_N$ зависит от энергии сублимации (парообразования) SF_6 и температуры кластера $(\text{CO}_2)_N$, и его можно оценить из выражения [28]

$$\tau = \tau_0 \exp(\Delta E_{\text{cv}}/k_B T_{\text{cl}}), \quad (2)$$

где τ_0 – период ван-дер-ваальсовых колебаний молекулы на поверхности кластера; ΔE_{cv} – теплота сублимации (парообразования) на одну молекулу; T_{cl} – температура кластера $(\text{CO}_2)_N$; k_B – постоянная Больцмана. Оценки, сделанные нами на основе существующих в литературе данных для приведенных в соотношении (2) параметров ($\tau_0 \approx 10^{-13}$ с [7], $T_{\text{cl}} = 100 - 120$ К [7, 23], теплота сублимации $E_{\text{cv}} = 5.46$ ккал/моль [15]), показывают, что время τ составляет от нескольких десятков до нескольких сотен микросекунд.

Отметим теперь, что поскольку детектирование молекулярных и кластерных пучков с помощью ПЭП основано на измерении энергии пучка и приемник работает при комнатной температуре, то в случае детектирования молекулярных пучков, энергия молекул в которых E_b удовлетворяет условию $E_b > k_B T_s$ (T_s – температура поверхности активного элемента приемника), на ПЭП индуцируется положительный сигнал. В случае же детектирования низкоэнергетических молекулярных пучков ($E_b < k_B T_s$), а также кластерных пучков на ПЭП индуцируется отрицательный сигнал [22]. Генерация отрицательного сигнала в случае детектирования кластерных пучков обусловлена тем, что при столкновении с поверхностью ПЭП кластеры диссоциируют, а энергия, необходимая для их диссоциации, отбирается от поверхности детектора. Особенности детектирования молекулярных и кластерных пучков с помощью ПЭП подробно описаны в работе [22]. Таким образом, молекулы и кластеры индуцировали на ПЭП сигналы соответственно положительной и отрицательной полярности. Селективное колебательное возбуждение рассеянных от кластеров молекул SF_6 интенсивным импульсом CO_2 -лазера приводило к значительному увеличению внутренней энергии молекул и в результате – к существенному увеличению индуцированного ими сигнала на детекторе.

3. Результаты и их обсуждение

В экспериментах нами измерялись времяпролетные спектры кластерного пучка $(\text{CO}_2)_N$ и молекул SF_6 , сублимировавших с поверхности кластеров, а также спектральные и энергетические характеристики ИК многофотонного поглощения этих молекул и молекул SF_6 в исходном молекулярном пучке. Полученные результаты по поглощению молекул сопоставлялись с целью лучшего понимания сути исследуемых вопросов. На рис.2 показаны сигналы, индуцированные на установленном под углом $\theta \approx 2^\circ$ детекторе кластерным пучком $(\text{CO}_2)_N$ в отсутствие молекулярного пучка, кластерным пучком и сублимировавшими с поверхности кластеров молекулами SF_6 без

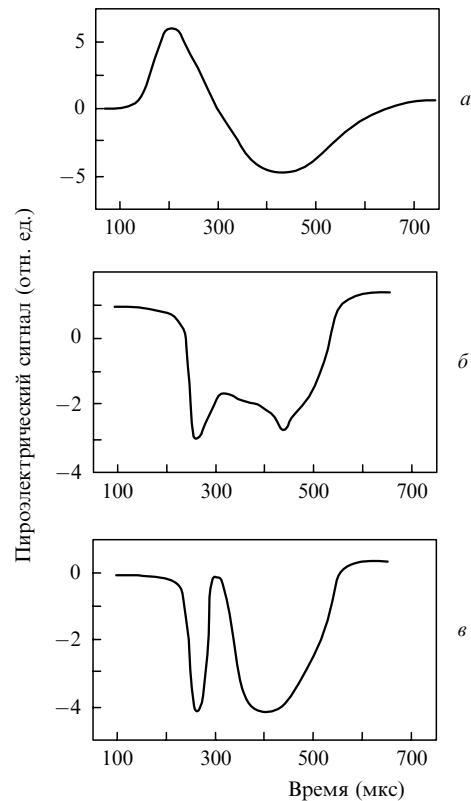


Рис.2. Сигналы, индуцированные на ПЭП кластерным пучком $(\text{CO}_2)_N$ в отсутствие молекулярного пучка (а), кластерным пучком и сублимировавшими с поверхности кластеров молекулами SF_6 без возбуждения (б), а также кластерным пучком и сублимировавшими с поверхности кластеров молекулами SF_6 при их колебательном возбуждении импульсом интенсивного излучения CO_2 -лазера (в). Давление газов над соплами: $\text{CO}_2 - 4.5$ атм, $\text{SF}_6 - 2.25$ атм; расстояние от сопла до приемника, детектирующего кластерный пучок, 200 мм.

предварительного возбуждения, а также кластерным пучком и сублимировавшими молекулами SF_6 при их возбуждении импульсом излучения CO_2 -лазера. Прежде всего из рис.2,а видно, что молекулы и кластеры индуцируют на ПЭП сигналы разной полярности, как это установлено в работе [22]. «Молекулярная составляющая» пучка CO_2 (положительный сигнал) полностью исчезает при включении молекулярного пучка SF_6 (рис.2,б, в), поскольку молекулы и малые кластеры $(\text{CO}_2)_N$ отклоняются на большие углы. Из рис.2,б видно, что на фоне отрицательного сигнала от кластеров $(\text{CO}_2)_N$ на детекторе молекулами SF_6 , сублимировавшими с поверхности кластеров, индуцируется положительный сигнал. Этот сигнал существенно возрастает при резонансном возбуждении SF_6 мощным импульсом излучения CO_2 -лазера (рис.2,в). Дополнительный сигнал, индуцированный на ПЭП за счет возбуждения молекул, является мерой поглощенной молекулами энергии из лазерного пучка [12, 14, 15]. Поэтому, измеряя величину этого сигнала в зависимости от частоты и плотности энергии возбуждающего импульса, можно получить спектральные и энергетические характеристики ИК многофотонного поглощения молекул SF_6 , сублимировавших с поверхности кластеров $(\text{CO}_2)_N$.

На рис.3 приведены зависимости поглощенной энергии лазерного пучка от плотности энергии возбуждающего импульса для молекул SF_6 , сублимировавших с поверхности кластеров $(\text{CO}_2)_N$, и молекул SF_6 в исходном молекулярном пучке. Указанные зависимости получены

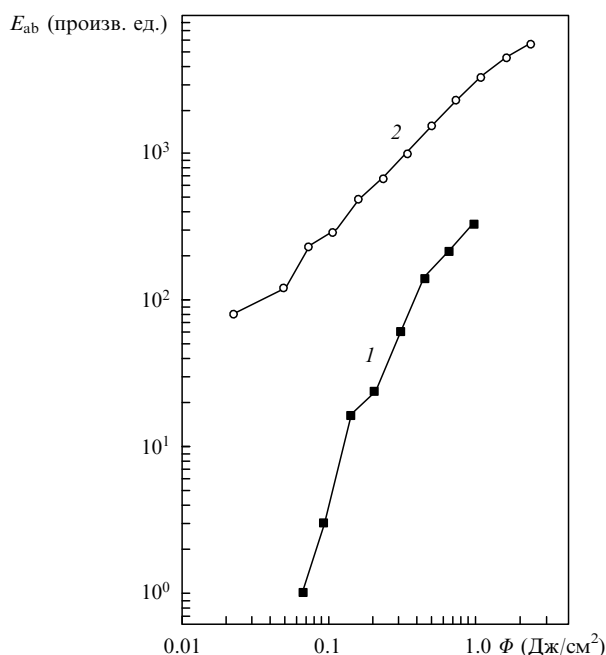


Рис.3. Зависимости поглощенной энергии E_{ab} от плотности энергии Φ возбуждающего импульса для молекул SF₆, сублимировавших с поверхности кластеров (CO₂)_N (1), и молекул SF₆ в исходном молекулярном пучке (2). Молекулы возбуждались на частоте 945.98 см⁻¹ (линия 10P18 излучения CO₂-лазера). Давление SF₆ над соплом 2.25 атм (1) и 1.1 атм (2), давление CO₂ над соплом 4.5 атм (1). Расстояние от сопла до детектора кластерного пучка 212 мм, от центра зоны пересечения пучков до детектора – 119 мм (1), от сопла до приемника – 90 мм (2).

при возбуждении молекул на частоте 945.98 см⁻¹ (линия 10P18 излучения CO₂-лазера), на которой наблюдалось максимальное поглощение. Видно, что зависимости имеют разный наклон. В обоих случаях в исследуемом диапазоне плотностей энергии имеет место нелинейный характер зависимости поглощенной энергии E_{ab} от плотности энергии возбуждающего излучения Φ ($E_{ab} \sim \Phi^n$) с $n \geq 1.5$ (кривая 1) и $n \geq 1 - 1.1$ (кривая 2). Именно такой характер зависимостей $E_{ab}(\Phi)$ с $n \geq 1$ наблюдался в экспериментах по возбуждению SF₆ в газодинамически охлажденных молекулярных пучках и струях в целом ряде ранних работ [11, 12, 14, 15]. Следовательно, в случае зависимости 1 мы также имеем дело с холодными и свободными молекулами SF₆. Более крутой наклон зависимости 1 по сравнению с 2 указывает на то, что колебательная температура молекул в первом случае ниже колебательной температуры молекул во втором случае [12, 14, 15, 29]. Зависимости $E_{ab}(\Phi)$, аналогичные представленным на рис.3, были получены нами при использовании целого ряда линий излучения CO₂-лазера. На их основе нами были построены спектры МФП молекул SF₆ при разных плотностях энергии возбуждения.

На рис.4 приведены спектры ИК многофотонного поглощения молекул SF₆, сублимировавших с поверхности кластеров (CO₂)_N, и молекул SF₆ в исходном газодинамически охлажденном молекулярном пучке. Существенное различие между ними состоит в том, что спектр рассеянных от кластеров молекул SF₆ значительно уже с низкочастотной стороны. Как установлено в [12, 14, 29], подавление низкочастотного крыла спектра МФП молекул SF₆ происходит в результате понижения колебательной температуры молекул. Таким образом, полученные ре-

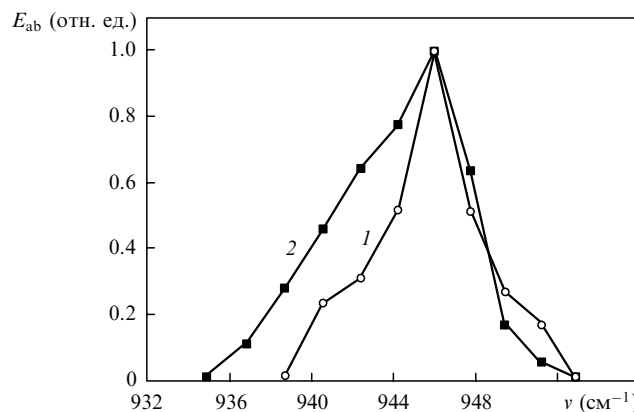


Рис.4. Спектры ИК многофотонного поглощения молекул SF₆, сублимировавших с поверхности кластеров (CO₂)_N (1), и в исходном газодинамически охлажденном молекулярном пучке (2). Плотность энергии возбуждающего излучения 1 Дж/см², давление SF₆ над соплом 2.25 атм (в обоих случаях). Расстояние от сопла до детектора кластерного пучка 212 мм, от центра зоны пересечения пучков до детектора – 119 мм (1); расстояние от сопла до приемника 90 мм (2). Каждый спектр нормирован на максимальную поглощенную энергию.

зультаты показывают, что колебательная температура молекул SF₆, сублимировавших с поверхности кластеров (CO₂)_N, значительно меньше колебательной температуры молекул SF₆ в исходном молекулярном пучке. Ранее в работах [12, 29, 30] нами было показано, что колебательная температура молекул SF₆ в импульсном газодинамически охлажденном молекулярном пучке $T_{vib} \leq 150 - 160$ К, а вращательная температура $T_{rot} \leq 40$ К. Поэтому из сравнения спектров, приведенных на рис.4, можно сделать вывод, что молекулы SF₆, сублимировавшие с поверхности кластеров (CO₂)_N, имеют колебательную температуру $T_{vib} < 150$ К, а следовательно, и температура наночастиц (CO₂)_N в кластерном пучке $T_{cl} < 150$ К [10].

Полученный нами результат (довольно низкая колебательная температура молекул SF₆, сублимировавших с поверхности кластеров, по сравнению с колебательной температурой молекул в исходном пучке) показывает также, что за время нахождения на поверхности наночастиц (CO₂)_N захваченные молекулы SF₆, вероятно, успевают прийти в полное температурное равновесие с кластерами. Поэтому они являются своего рода миниатюрными молекулярными термометрами, которые несут реальную информацию о температуре наночастиц.

4. Заключение

Таким образом, в работе установлено, что молекулы SF₆, захваченные ван-дер-ваальсовыми кластерами (CO₂)_N в пересекающихся молекулярном и кластерном пучках, через определенное время сублимируют с поверхности кластеров, неся информацию об их скорости и температуре. Изучен процесс ИК многофотонного возбуждения указанных молекул. Получены спектры ИК МФП молекул SF₆, сублимировавших с поверхности кластеров. Показано, что эти спектры значительно уже спектров МФП молекул SF₆ в газодинамически охлажденном молекулярном пучке, что указывает на более низкую колебательную температуру молекул, сублимировавших с поверхности кластеров ($T_{vib} < 150$ К), по сравнению с колебательной температурой молекул в исходном пучке.

Этот результат находится в хорошем согласии с данными о температуре больших ван-дер-ваальсовых кластеров $(\text{CO}_2)_N$ ($N \geq 10^3$), генерируемых в сопловых источниках без газа-носителя ($T_{\text{cl}} \approx 100 - 120$ К), которые получены методом дифракции электронов [23].

Возможность получения сильно колебательно-охлажденных молекул за счет их сублимации с поверхности холодных кластеров представляет интерес для реализации высокоселективных процессов ИК многофотонного возбуждения и диссоциации молекул, а также для лазерного разделения изотопов тяжелых элементов. Недостатком при этом является низкая концентрация сильно колебательно-охлажденных молекул, получаемых расматриваемым методом, по сравнению с концентрацией молекул в исходном пучке. Так, на основе данных по поглощенной энергии, приведенных на рис.3, можно заключить, что концентрация молекул SF_6 , сублимирующих с поверхности кластеров $(\text{CO}_2)_N$, примерно на порядок меньше концентрации молекул в исходном пучке. Вместе с тем следует отметить, что концентрацию молекул в первом случае можно увеличить за счет оптимизации процесса захвата молекул кластерами (например, используя более плотные кластерные пучки). Сильно колебательно-охлажденные молекулы необходимы также для исследования ряда других атомно-молекулярных процессов (химических реакций, процессов на поверхности, в том числе на поверхности кластеров и наночастиц).

Авторы выражают благодарность В.Н.Лохману за помощь в работе над рисунками. Работа частично поддержана РФФИ (гранты № 06-02-16634, 07-02-00165 и 09-02-00531).

1. Pauly H. *Atom, Molecule, and Cluster Beams II, Cluster Beams, Fast and Slow Beams, Accessory Equipment and Applications* (New York: Springer, 2000).
2. Perez A., Melinon P., et al. *J. Phys. D: Appl. Phys.*, **30**, 709 (1997).
3. Смирнов Б.М. *УФН*, **173**, 609 (2003).
4. Yamada I., Toyoda N. *Nucl. Instr. Meth. B*, **232**, 195 (2005).
5. Макаров Г.Н. *УФН*, **176**, 121 (2006).
6. Кресин В.З., Овчинников Ю.Н. *УФН*, **178**, 449 (2008).
7. Макаров Г.Н. *УФН*, **178**, 337 (2008).
8. Moro R., Yin S.Y., Xu X.S., de Heer W.A. *Phys. Rev. Lett.*, **93**, 086803 (2004).
9. Xu X.S., Yin S.Y., Moro R., et al. *Phys. Rev. B*, **75**, 085429 (2007).
10. Макаров Г.Н., Петин А.Н. *Письма в ЖЭТФ*, **89**, 468 (2009).
11. Apatin V.M., Makarov G.N. *Appl. Phys. B*, **28** 367 (1982).
12. Апатин В.М., Макаров Г.Н. *ЖЭТФ*, **84**, 15 (1983).
13. Makarov G.N., Ronander E., van Heerden S.P., Gouws M., van der Merwe K. *Appl. Phys. B*, **65** 583 (1997).
14. Макаров Г.Н. *УФН*, **173**, 913 (2003).
15. Макаров Г.Н. *УФН*, **175**, 41 (2005).
16. Макаров Г.Н., Петин А.Н. *Квантовая электроника*, **36** (3), 889 (2006).
17. Макаров Г.Н., Петин А.Н. *ЖЭТФ*, **130** (5), 804 (2006).
18. Toennies J.P., Vilesov A.F., Whaley K.B. *Phys. Today*, **54** (2), 31 (2001).
19. Макаров Г.Н. *УФН*, **176**, 1155 (2006).
20. Gspann J.Z. *Phys. B*, **98**, 405 (1995).
21. Gentry W.R., Giese C.F. *Rev. Sci. Instrum.*, **49**, 595 (1978).
22. Макаров Г.Н., Петин А.Н. *ЖЭТФ*, **134**, 851 (2008).
23. Torchet G. *Docteur es-Sciences Thesis* (Paris: Paris Univ., 1978).
24. *Справочник химика* (Под ред. Б.П.Никольского) (Л.: Госхимиздат, 1963, т. 1).
25. McDowell R.S., Krohn B.J., Flicker H., Vasquez M. C. *Spectrochim. Acta A*, **42**, 351 (1986).
26. Lewerenz M., Schilling B., Toennies J.P. *Chem. Phys. Lett.*, **206**, 381 (1993).
27. Lewerenz M., Schilling B., Toennies J.P. *J. Chem. Phys.*, **102**, 8191 (1995).
28. Френкель Я.И. *Кинетическая теория жидкостей* (М.-Л.: изд-во АН СССР, 1945).
29. Апатин В.М., Макаров Г.Н. *Квантовая электроника*, **9**, 1668 (1982).
30. Apatin V.M., Dorozhkin L.M., Makarov G.N., Pleshkov L.M. *Appl. Phys. B*, **29**, 273 (1982).