

# ИК многофотонное возбуждение молекул SF<sub>6</sub>, сублимирующих с поверхности наночастиц (CO<sub>2</sub>)<sub>N</sub> в кластерном пучке

Г.Н.Макаров, А.Н.Петин

*Изучено ИК многофотонное возбуждение молекул SF<sub>6</sub>, сублимирующих с поверхности ван-дер-ваальсовых кластеров (наночастиц) (CO<sub>2</sub>)<sub>N</sub> в кластерном пучке ( $N \geq 10^2$  – число мономеров в кластере). Молекулы SF<sub>6</sub> 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 SF<sub>6</sub>, сублимирующих с поверхности кластеров, значительно уже аналогичных спектров молекул SF<sub>6</sub> 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 SF<sub>6</sub>, захваченные большими ван-дер-ваальсовыми кластерами (наночастицами) (CO<sub>2</sub>)<sub>N</sub> 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 SF<sub>6</sub>, сублимирующих с поверхности кластеров, мы оценили температуру наночастиц (CO<sub>2</sub>)<sub>N</sub> 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 (SF<sub>6</sub>, WF<sub>6</sub>, UF<sub>6</sub>). 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 SF<sub>6</sub>, сублимирующих с поверхности наночастиц (CO<sub>2</sub>)<sub>N</sub> в кластерном пучке. Установлено, что спектры МФП таких молекул значительно уже спектров МФП SF<sub>6</sub> 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 (CO<sub>2</sub>)<sub>N</sub> пересекался под прямым углом с импульсным молекулярным пучком SF<sub>6</sub>; в зоне их пересечения происходил захват молекул SF<sub>6</sub> кластерами (CO<sub>2</sub>)<sub>N</sub>. При этом молекулы передавали кластерам импульс [18–20], в результате чего кластеры отклонялись на некоторый угол  $\theta$ . 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  $\sim 0.5$  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 (CO<sub>2</sub>)<sub>N</sub> с числом частиц  $N \geq 10^2 - 10^3$ . Отметим, что большие кластеры (CO<sub>2</sub>)<sub>N</sub> имеют кристаллическую структуру [7, 23].

Для получения молекулярного пучка SF<sub>6</sub> 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.

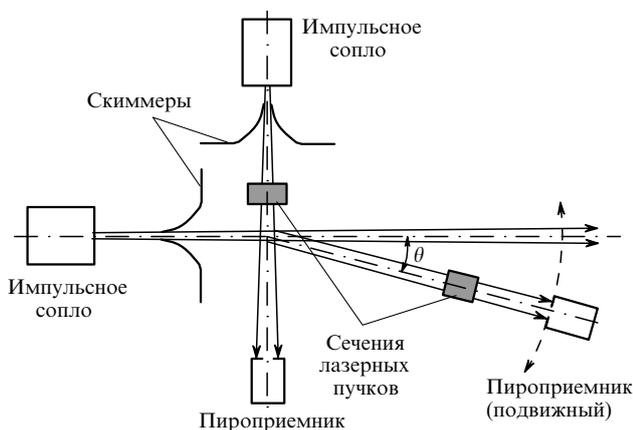


Рис. 1. Схема эксперимента.

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 SF<sub>6</sub> (5.46 ккал/моль [24]) меньше теплоты сублимации CO<sub>2</sub> (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 SF<sub>6</sub> осуществлялось перестраиваемым по частоте интенсивным (свыше  $10^6 - 10^7$  Вт/см<sup>2</sup>) излучением импульсного CO<sub>2</sub>-лазера. Энергия в импульсе не превышала 3 Дж. Импульс генерации состоял из пика длительностью по полувысоте около 100 нс и хвостовой части длительностью  $\sim 0.6$  мкс, в которой содержалось примерно 50 % энергии. Возбуждалось активное в ИК области колебание  $\nu_3$  молекулы SF<sub>6</sub> ( $948 \text{ см}^{-1}$  [25]). Лазерное излучение пересекало молекулярный пучок под прямым углом на расстоянии 75 мм от среза сопла (рис. 1). При исследовании ИК многофотонного поглощения молекул SF<sub>6</sub>, сублимировавших с поверхности кластеров (CO<sub>2</sub>)<sub>N</sub>, 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 SF<sub>6</sub> в молекулярном пучке, а также молекул SF<sub>6</sub>, 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;  $\alpha$  – 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 SF<sub>6</sub> кластеры (CO<sub>2</sub>)<sub>N</sub> 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 SF<sub>6</sub> через определенное время сублимируют с поверхности кластеров. Это было установлено по индуцированному колебательно-возбужденными молекулами SF<sub>6</sub> 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  $\tau$  молекулы  $\text{SF}_6$  на поверхности кластера  $(\text{CO}_2)_N$  зависит от энергии сублимации (парообразования)  $\text{SF}_6$  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  $\tau_0$  – период ван-дер-ваальсовых колебаний молекулы на поверхности кластера;  $\Delta E_{\text{cv}}$  – теплота сублимации (парообразования) на одну молекулу;  $T_{\text{cl}}$  – 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  $\tau$  составляет от нескольких десятков до нескольких сотен пикосекунд.

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  $\text{SF}_6$  интенсивным импульсом  $\text{CO}_2$ -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  $\text{SF}_6$ , сублимировавших с поверхности кластеров, а также спектральные и энергетические характеристики ИК многофотонного поглощения этих молекул и молекул  $\text{SF}_6$  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  $\text{SF}_6$  без

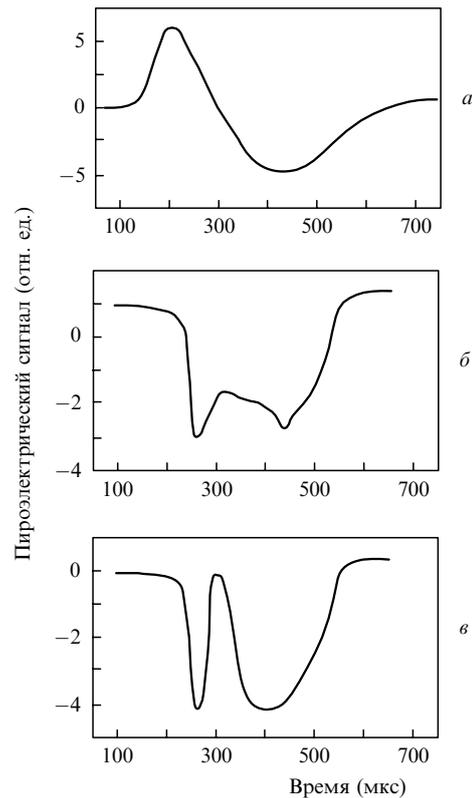


Рис.2. Сигналы, индуцированные на ПЭП кластерным пучком  $(\text{CO}_2)_N$  в отсутствие молекулярного пучка (а), кластерным пучком и сублимировавшими с поверхности кластеров молекулами  $\text{SF}_6$  без возбуждения (б), а также кластерным пучком и сублимировавшими с поверхности кластеров молекулами  $\text{SF}_6$  при их колебательном возбуждении импульсом интенсивного излучения  $\text{CO}_2$ -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  $\text{SF}_6$  при их возбуждении импульсом излучения  $\text{CO}_2$ -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  $\text{CO}_2$  (положительный сигнал) полностью исчезает при включении молекулярного пучка  $\text{SF}_6$  (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  $\text{SF}_6$ , сублимировавшими с поверхности кластеров, индуцируется положительный сигнал. Этот сигнал существенно возрастает при резонансном возбуждении  $\text{SF}_6$  мощным импульсом излучения  $\text{CO}_2$ -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  $\text{SF}_6$ , сублимировавших с поверхности кластеров  $(\text{CO}_2)_N$ .

На рис.3 приведены зависимости поглощенной энергии лазерного пучка от плотности энергии возбуждающего импульса для молекул  $\text{SF}_6$ , сублимировавших с поверхности кластеров  $(\text{CO}_2)_N$ , и молекул  $\text{SF}_6$  в исходном молекулярном пучке. Указанные зависимости получены

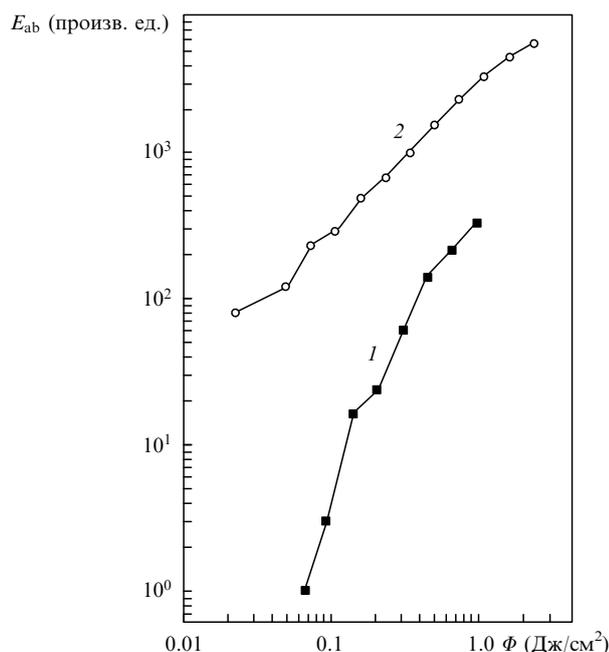


Рис.3. Зависимости поглощенной энергии  $E_{ab}$  от плотности энергии  $\Phi$  возбуждающего импульса для молекул SF<sub>6</sub>, сублимировавших с поверхности кластеров (CO<sub>2</sub>)<sub>N</sub> (1), и молекул SF<sub>6</sub> в исходном молекулярном пучке (2). Молекулы возбуждались на частоте 945.98 см<sup>-1</sup> (линия 10P18 излучения CO<sub>2</sub>-лазера). Давление SF<sub>6</sub> над соплом 2.25 атм (1) и 1.1 атм (2), давление CO<sub>2</sub> 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<sup>-1</sup> (линия 10P18 излучения CO<sub>2</sub>-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  $\Phi$  ( $E_{ab} \sim \Phi^n$ ) 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 SF<sub>6</sub> 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 SF<sub>6</sub>. 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 CO<sub>2</sub>-лазера. На их основе нами были построены спектры МФП молекул SF<sub>6</sub> при разных плотностях энергии возбуждения.

На рис.4 приведены спектры ИК многофотонного поглощения молекул SF<sub>6</sub>, сублимировавших с поверхности кластеров (CO<sub>2</sub>)<sub>N</sub>, и молекул SF<sub>6</sub> в исходном газодинамически охлажденном молекулярном пучке. Существенное различие между ними состоит в том, что спектр рассеянных от кластеров молекул SF<sub>6</sub> значительно уже с низкочастотной стороны. Как установлено в [12, 14, 29], подавление низкочастотного крыла спектра МФП молекул SF<sub>6</sub> происходит в результате понижения колебательной температуры молекул. Таким образом, полученные ре-

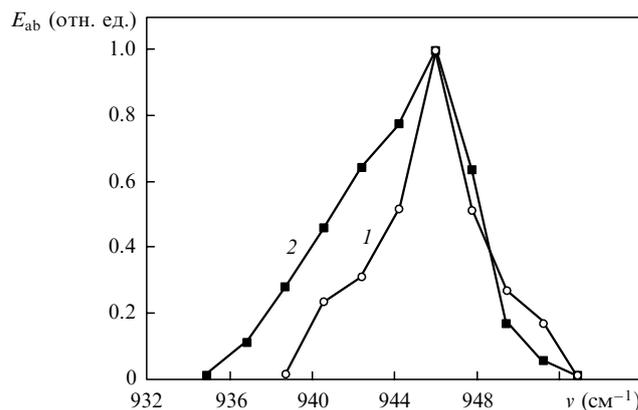


Рис.4. Спектры ИК многофотонного поглощения молекул SF<sub>6</sub>, сублимировавших с поверхности кластеров (CO<sub>2</sub>)<sub>N</sub> (1), и в исходном газодинамически охлажденном молекулярном пучке (2). Плотность энергии возбуждающего излучения 1 Дж/см<sup>2</sup>, давление SF<sub>6</sub> над соплом 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 SF<sub>6</sub>, сублимировавших с поверхности кластеров (CO<sub>2</sub>)<sub>N</sub>, значительно меньше колебательной температуры молекул SF<sub>6</sub> в исходном молекулярном пучке. Ранее в работах [12, 29, 30] нами было показано, что колебательная температура молекул SF<sub>6</sub> 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 SF<sub>6</sub>, сублимировавшие с поверхности кластеров (CO<sub>2</sub>)<sub>N</sub>, имеют колебательную температуру  $T_{vib} < 150$  К, а следовательно, и температура наночастиц (CO<sub>2</sub>)<sub>N</sub> в кластерном пучке  $T_{cl} < 150$  К [10].

Полученный нами результат (довольно низкая колебательная температура молекул SF<sub>6</sub>, сублимировавших с поверхности кластеров, по сравнению с колебательной температурой молекул в исходном пучке) показывает также, что за время нахождения на поверхности наночастиц (CO<sub>2</sub>)<sub>N</sub> захваченные молекулы SF<sub>6</sub>, 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 SF<sub>6</sub>, захваченные ван-дер-ваальсовыми кластерами (CO<sub>2</sub>)<sub>N</sub> 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 SF<sub>6</sub>, сублимировавших с поверхности кластеров. Показано, что эти спектры значительно уже спектров МФП молекул SF<sub>6</sub> 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  $\text{SF}_6$ , 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).