Письма в ЖЭТФ, том 97, вып. 2, с. 82 – 87

Дезинтеграция кластеров аргона при столкновении с колебательно-высоковозбужденными молекулами SF_6 в пересекающихся молекулярном и кластерном пучках

Г. Н. Макаров+1), А. Н. Петин+*

+Институт спектроскопии РАН, 142190 Троицк, Россия

*Троицкий институт инновационных и термоядерных исследований, 142190 Троицк, Россия

Поступила в редакцию 6 ноября 2012 г.

Обнаружено, что при столкновении колебательно-высоковозбужденных молекул SF_6 (с колебательной энергией $E_{\mathrm{vib}} \geq (0.5{-}2.0)$ эВ) с кластерами Ar_N (где $N \leq 30{-}40$ – число атомов в кластере) в пересекающихся кластерном и молекулярном пучках происходят захват молекул кластерами и последующая полная дезинтеграция кластеров. Обсуждаются возможности применения данного эффекта для селективного допирования кластеров молекулами, лазерного разделения изотопов и селективной транспортировки молекул на поверхность.

DOI: 10.7868/S0370274X13020033

1. Молекулярные и кластерные пучки широко используются в научных исследованиях для изучения химических реакций, процессов адсорбции и десорбции, других элементарных физико-химических процессов на поверхности, а также для транспортировки атомов и молекул на поверхность с целью нанесения микро- и наноструктур, получения тонких пленок и новых материалов [1–11]. Возможность допирования кластеров молекулами за счет захвата молекул кластерами из молекулярного пучка или при прохождении кластерного пучка через ячейку, содержащую молекулярный газ [12, 13], значительно расширяет область применения молекулярных и кластерных пучков. Например, это открывает большие возможности для спектроскопии и исследования самих кластеров [12–19], изучения элементарных процессов, происходящих внутри или на поверхности кластеров [16, 18, 19], а также для исследования процессов на поверхности.

Недавно процессы взаимодействия молекулярных и кластерных пучков были использованы для измерения температуры больших кластеров (наночастиц) CO_2 и CF_3I в кластерных пучках [20–24], а также для проведения селективных процессов захвата молекул кластерами [25]. В данной работе нами исследовалось взаимодействие колебательно-высоковозбужденных молекул SF_6 (с энергией $E_{\mathrm{vib}} \geq (0.5{-}2.0)$ эВ) с кластерами Ar_N. Обнаружено, что захват кластерами Ar_N колебательно-возбужденных молекул SF_6 приводит к полной дезинтеграции кластеров с размерами $N \leq 30{-}40$ и высвобождению захваченных молекул.

2. В экспериментах (рис. 1) интенсивный импульсный кластерный пучок Ar_N пересекался под

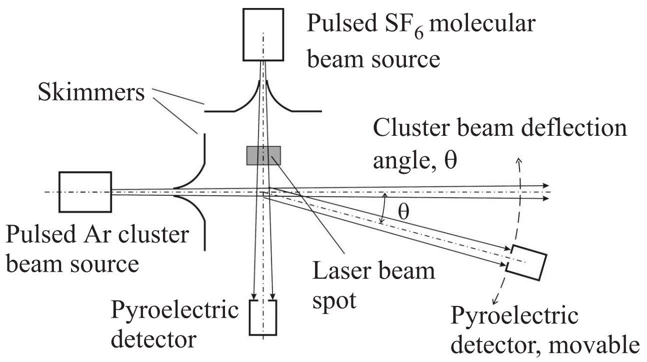

Рис. 1. Схема эксперимента

прямым углом с импульсным молекулярным пучком SF_6. В зоне пересечения происходил захват молекул кластерами. При этом молекулы передавали кластерам импульс [18, 26, 27]. В результате кластеры отклонялись на угол θ, определяемый соотношением

$$\mathrm{tg}\,\theta = \frac{\sin\alpha}{m_1 v_1/m_2 v_2 + \cos\alpha}, \tag{1}$$

где m_1, m_2 и v_1, v_2 – массы и скорости кластеров и молекул в пучках, а α – угол между кластерным и молекулярным пучками. В условиях эксперимента ($\alpha = 90^\circ$, $m_2 \approx 146$ а.е.м., $v_1 \approx 600$ м/с и

1)e-mail: gmakarov@isan.troitsk.ru

$v_2 \approx 430$ м/с – измеренные нами скорости кластеров и молекул в пучках) при захвате одиночных молекул SF_6 кластеры Ar_N с числом частиц $N = 15$ отклонялись на угол $\theta \approx 10°$, а с $N = 30$ – на угол $\theta \approx 5°$.

Для получения кластерного пучка использовалось импульсное сопло типа "токовая петля" [28] с диаметром отверстия 0.75 мм и длительностью импульса открывания около 120 мкс (по полувысоте). С целью более эффективной генерации кластеров срез сопла был выполнен в форме конуса с полным углом раствора 18°. Длина конуса 32 мм. Давление газа над соплом изменялось в диапазоне от 0.5 до 4.5 атм. Формирование кластерных пучков с помощью импульсного сопла подробно изучено в работе [29]. В условиях данных экспериментов генерировались кластеры Ar_N со средним числом частиц $N \geq 10^2$. Однако из-за неоднородного распределения концентрации атомов в импульсных пучках и широкого распределения кластеров по размерам в пучке содержалось довольно много кластеров с $N \leq 50$. Отметим, что большие кластеры аргона ($N \geq 50$) имеют твердую структуру [30, 31].

В качестве источника молекулярного пучка SF_6 использовалось импульсное сопло типа "General Valve" с диаметром отверстия 0.8 мм. Срез сопла имел форму конуса с полным углом раствора 20°. Длина конуса 22 мм. Длительность импульса открывания сопла составляла около 300 мкс по полувысоте. Давление газа над соплом 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 3 и 6 мм, которые располагались на расстояниях 30 и 26 мм от сопел соответственно. Детектирование молекулярного и кластерного пучков производилось с помощью неохлаждаемых пироэлектрических приемников (ПЭП), имеющих временное разрешение около 5–10 мкс и площадь активного элемента $4 \times 4\,мм^2$ [32, 33]. Приемники могли устанавливаться на различных расстояниях от сопел. Вакуумная камера, в которой формировались молекулярный и кластерный пучки, откачивалась до давления $\approx 3 \cdot 10^{-6}$ торр диффузионным насосом.

Колебательное возбуждение молекул SF_6 в пучке производилось интенсивным излучением импульсного CO_2 лазера. Энергия излучения в импульсе достигала 3 Дж, длительность импульса по полувысоте составляла около 100 нс. Лазером возбуждалось активное в ИК-области колебание ν_3 молекулы (948 см$^{-1}$ [34]). Процесс возбуждения молекул исследовался с помощью пироэлектрического метода детектирования поглощенной энергии [32, 33, 35, 36]. Сигнал, индуцированный на ПЭП молекулярным и кластерным пучками, усиливался (примерно в 100 раз) и подавался на цифровой осциллограф Tektronix TDS-1002. Молекулярный и кластерный пучки функционировали в режиме одиночных импульсов. При измерениях сигнал с детектора усреднялся по 16 импульсам.

Отметим, что в случае детектирования с помощью ПЭП молекулярных пучков, полная энергия молекул $E_{\rm tot}$ в которых удовлетворяет условию $E_{\rm tot} > k_{\rm B}T_s$ (где $k_{\rm B}T_s$ – энергия поверхности активного элемента приемника), на ПЭП индуцируется положительный сигнал. В случае же детектирования низкоэнергетических молекулярных пучков ($E_{\rm tot} < k_{\rm B}T_s$), а также кластерных пучков на ПЭП индуцируется отрицательный сигнал [29]. Генерация отрицательного сигнала в случае детектирования кластерных пучков объясняется тем, что при столкновении с поверхностью ПЭП кластеры диссоциируют, а энергия, необходимая для их диссоциации, отбирается от поверхности детектора. Таким образом, атомы и кластеры аргона индуцировали на ПЭП сигналы положительной и отрицательной полярности соответственно [29] (рис. 2).

Молекулярный и кластерный пучки, а также возбуждающий молекулы SF_6 импульсный CO_2 лазер были синхронизованы таким образом, что возбужденные молекулы взаимодействовали с кластерами, находящимися в передней части импульса кластерного пучка (рис. 2), где максимальна доля кластеров небольшого размера (с $N \leq 50$).

3. Суть описываемого метода состоит в следующем. При захвате молекулы кластером за время ≤ 1 нс захваченная молекула передает энергию кластеру. В результате кластер нагревается. Нагретый кластер охлаждается за счет испарения атомов и захваченных молекул. Имеет место колебательная предиссоциация кластера. Если энергия связи атомов в кластере мала, значительно меньше энергии связи захваченной молекулы с атомами кластера, то кластер будет охлаждаться преимущественно за счет испарения собственных атомов, а захваченные молекулы будут высвобождаться в последнюю очередь. Именно такой процесс, на наш взгляд, был реализован в случае захвата молекул SF_6 кластерами аргона, характеризующимися небольшой энергией связи атомов в кластере (см. ниже).

В экспериментах измерялись зависимости $E_{\rm ab}(\Phi)$ поглощенной молекулами SF_6 энергии $E_{\rm ab}$ от плотности энергии Φ возбуждающего импульса CO_2-лазера до столкновения с кластерами Ar_N, а также зависимости $E_{\rm res}(\Phi)$ остаточной после разрушения класте-

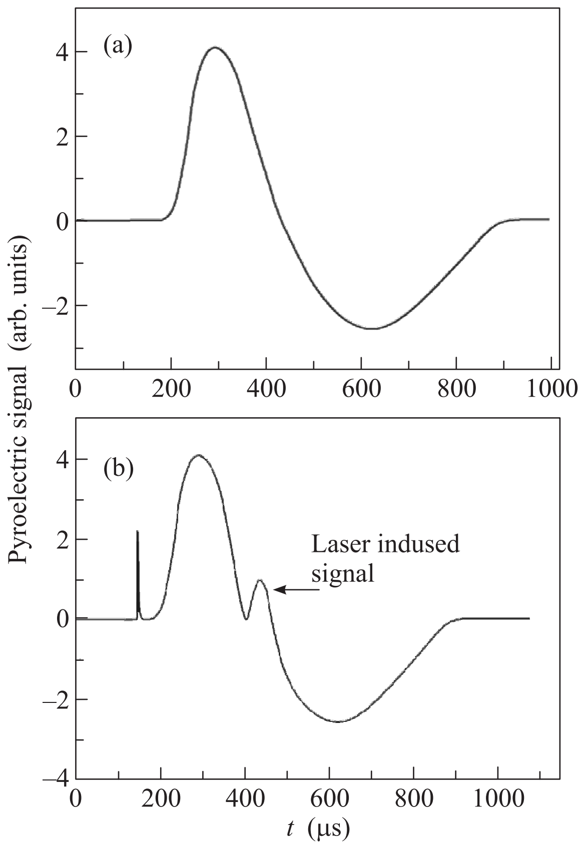

Рис. 2. Сигналы, индуцированные на детекторе, установленном под углом $\theta \approx 10^\circ$, кластерным пучком Ar_N с захваченными молекулами SF_6 без колебательного возбуждения молекул до столкновения с кластерами (a) и в случае колебательного возбуждения молекул (b) (первый пик – световая наводка от возбуждающего молекулы SF_6 лазерного импульса). Молекулы возбуждались на частоте 945.98 см$^{-1}$ (линия 10P(18) лазера) при плотности энергии $\Phi = 1.0$ Дж/см^2. Давления газов Ar и SF_6 над соплами 4.3 и 1.75 атм соответственно. Расстояние от сопла до приемника, детектирующего кластерный пучок, 211 мм

ров энергии $E_{\rm res}$ молекул SF_6 от плотности энергии возбуждающего излучения. В общем случае

$$E_{\rm res}(\nu,\Phi) = E_1 + E_{\rm ab}(\nu,\Phi) - E_{\rm cl.des}(N) - E_{\rm cl.fr}, \quad (2)$$

где E_1 – полная энергия (сумма кинетической, вращательной и колебательной энергии) молекулы SF_6 до возбуждения лазером, $E_{\rm ab}(\nu,\Phi)$ – энергия, поглощенная молекулой из лазерного импульса, $E_{\rm cl.des}(N)$ – энергия, необходимая для дезинтеграции кластера Ar_N, $E_{\rm cl.fr}$ – энергия образовавшихся фрагментов кластера.

Удельная энергия сублимации атома аргона в макроскопическом веществе $E_{\rm sub} = 0.080$ эВ, а удельная энергия испарения при температуре кипения $E_{\rm ev} = 0.068$ эВ [37, 38]. В небольших кластерах аргона эти величины меньше приведенных значений для макроскопического вещества, поскольку энергия связи атомов в кластере уменьшается с уменьшением размера кластера [39]. Так, например, в димере аргона энергия связи атомов составляет около 0.01 эВ [40]. С другой стороны, энергия испарения нескольких последних атомов аргона в кластере SF_6/Ar_N близка к энергии разрыва связи SF_6–Ar, которая составляет около 0.1 эВ [41]. Однако это не приводит к сильному увеличению суммарной энергии, необходимой для разрушения кластера рассматриваемого нами размера ($N \sim 10-40$). Поэтому можно полагать, что энергия дезинтеграции кластера размера N удовлетворяет условию

$$E_{\rm cl.des}(N) \le N E_{\rm cl.sub}(N), \quad (3)$$

где $E_{\rm cl.sub}(N)$ – энергия сублимации атома аргона с поверхности кластера размера N. В то же время с учетом сказанного выше выполняется условие

$$E_{\rm cl.\,sub}(N) \le E_{\rm sub} = 0.080\,\text{эВ}. \quad (4)$$

Дезинтеграция кластера Ar_N возможна, когда полная энергия захваченной молекулы SF_6 удовлетворяет условию

$$E_{\rm tot}(SF_6) = E_1 + E_{\rm ab}(\nu,\Phi) \ge E_{\rm cl.des}(N). \quad (5)$$

Таким образом, пока полная энергия захваченной молекулы SF_6 меньше энергии дезинтеграции кластера Ar_N, она целиком уходит на дезинтеграцию кластера. Однако при этом кластер разрушается не полностью. Кинетическая энергия фрагментов разрушающегося кластера мала (поскольку низка температура кластера). Поэтому сигнал на детекторе не индуцируется. В случае же, когда поглощенная молекулами SF_6 из лазерного поля энергия велика и выполняется условие

$$E_{\rm tot}(SF_6) > E_{\rm cl.des}(N), \quad (6)$$

будет иметь место полная дезинтеграция кластера аргона. Если при этом энергия E_2 высвободившихся молекул SF_6 превышает энергию поверхности активного элемента детектора ($E_2 > k_{\rm B}T_s \approx 0.025$ эВ), то на детекторе будет индуцироваться положительный сигнал [29]. Именно это и наблюдалось в наших экспериментах (рис. 2). При этом поскольку поглощенная молекулами SF_6 энергия зависит от частоты возбуждающего излучения, для разных частот возбуждения (разных линий генерации лазера) сигнал с ПЭП начинал индуцироваться при разных плотностях энергии (рис. 3b).

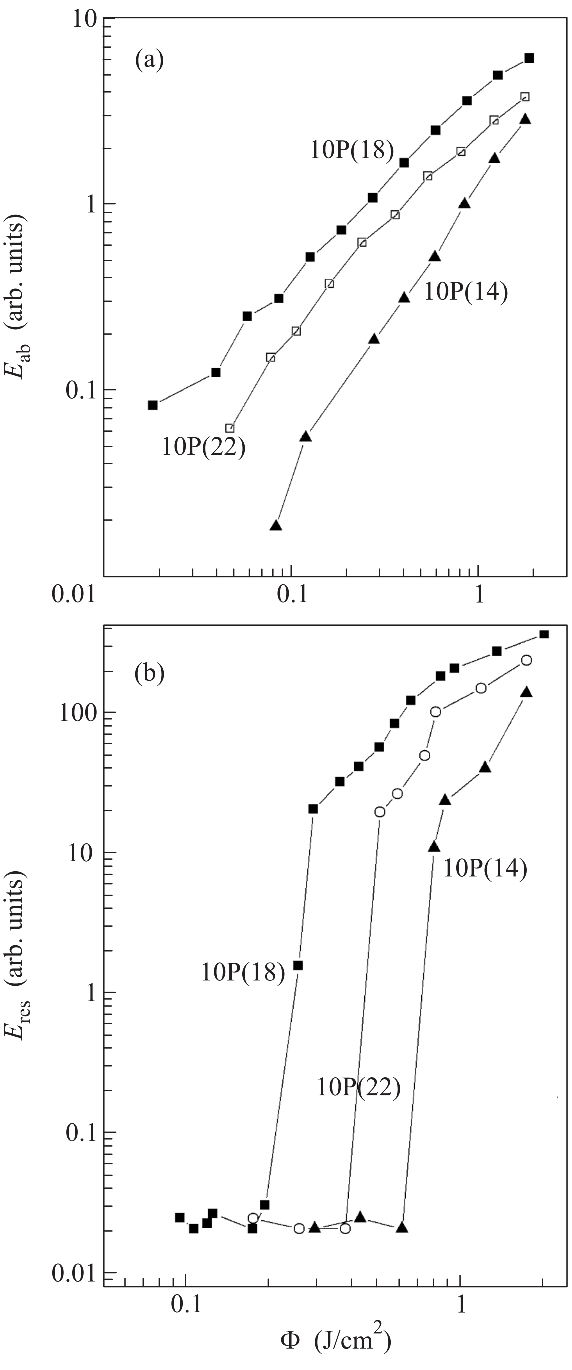

Рис. 3. Зависимости от плотности энергии возбуждающего лазерного излучения Φ для линий 10P(18), 10P(22) и 10P(14) CO_2 лазера поглощенной молекулами SF_6 в пучке энергии (a) и остаточной после разрушения кластеров энергии в молекулах SF_6 (b). Условия эксперимента те же, что и в случае рис. 2. На рис. (b) ось абсцисс растянута в два раза по сравнению с осью ординат

4. На рис. 3a приведены зависимости $E_{ab}(\Phi)$ поглощенной молекулами SF_6 в пучке энергии от плотности энергии возбуждающего излучения для линий CO_2 лазера, совпадающих с максимумом спектра ИК многофотонного поглощения (МФП) SF_6 (линия 10P(18) – 945.98 см$^{-1}$), а также с низкочастотным и высокочастотным крыльями спектра МФП (линии 10P(22) – 942.38 см$^{-1}$ и 10P(14) – 949.48 см$^{-1}$ соответственно). Обратим внимание на сравнительно гладкий степенной характер приведенных зависимостей. Поглощенная молекулами SF_6 энергия почти монотонно растет с увеличением плотности энергии возбуждения. Такой характер набора энергии молекулами наблюдался во многих ранних работах по ИК многофотонному возбуждению SF_6 (см., например, обзор [36] и ссылки в нем). Совершенно иной характер имеют приведенные на рис. 3b для тех же линий излучения лазера зависимости $E_{res}(\Phi)$. При небольших плотностях Φ энергии возбуждения E_{res} практически равна нулю для всех указанных линий. Лишь при плотностях энергии $\Phi \geq 0.2$ Дж/см^2 для линии 10P(18), $\Phi \geq 0.4$ Дж/см^2 для линии 10P(22) и $\Phi \geq 0.7$ Дж/см^2 для линии 10P(14) E_{res} очень резко увеличивается с ростом плотности энергии возбуждения. По существу, имеет место пороговый характер зависимости $E_{res}(\Phi)$. Он объясняется возникновением в кластерном пучке молекул SF_6, освободившихся в результате дезинтеграции кластеров. При плотностях энергии Φ, превышающих указанные пороговые значения, энергия освободившихся после разрушения кластеров молекул SF_6 достаточна для того, чтобы индуцировать сигнал на детекторе. Величина этого сигнала быстро растет с увеличением плотности энергии возбуждения, поскольку все большая доля поглощенной энергии остается в молекулах после разрушения кластеров. В рассматриваемом случае процесс испарения атомов в кластере с захваченной колебательно-возбужденной молекулой, по сути, можно рассматривать как процесс релаксации возбужденного состояния SF_6. Процесс релаксации энергии заканчивается, когда кластер полностью разрушается и в результате исчезает канал релаксации энергии. Поэтому при небольших ("надпороговых") плотностях энергии возбуждения молекулы SF_6, освободившиеся после дезинтеграции кластеров, имеют очень низкую поступательную и внутреннюю (колебательную и вращательную) энергию.

Из полученных результатов следует, что ширина спектральной зависимости $E_{res}(\nu)$ при фиксированной плотности энергии возбуждения молекул SF_6 будет значительно меньше ширины спектральной зависимости $E_{ab}(\nu)$, поскольку на крыльях спектра МФП SF_6 поглощенная энергия мала и ее недостаточно для дезинтеграции кластеров (рис. 4). Ширина зависимости $E_{\mathrm{res}}(\nu)$ резко уменьшается с уменьшени-

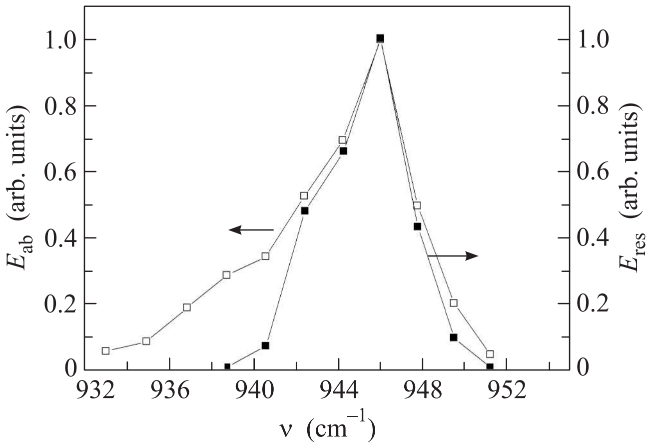

Рис. 4. Зависимости от частоты поглощенной молекулами SF_6 в пучке энергии (открытые квадраты) и остаточной после разрушения кластеров энергии в молекулах SF_6 (закрытые квадраты). Плотности энергии возбуждающего молекулы SF_6 излучения CO_2 лазера составляют 1.1 Дж/см^2 для $E_{\mathrm{ab}}(\nu)$ и 1.0 Дж/см^2 для $E_{\mathrm{res}}(\nu)$. Остальные условия эксперимента те же, что и в случае рис. 2

ем плотности энергии возбуждения. Так, например, при $\Phi \approx 0.5$ Дж/см^2 измеренная нами ширина спектральной зависимости $E_{\mathrm{ab}}(\nu)$ составляла (на полувысоте) около 6 см$^{-1}$, а ширина спектральной зависимости $E_{\mathrm{res}}(\nu)$ – менее 4 см$^{-1}$.

На основе полученных результатов и известных из литературы данных по ИК многофотонному поглощению молекул SF_6 в пучке можно оценить размер кластеров аргона, которые разрушались при столкновении с колебательно-возбужденными молекулами. Так, например, при возбуждении молекул SF_6 на линии 10P(16) лазера (947.74 см$^{-1}$) при плотности энергии $\Phi \approx 0.6$ Дж/см^2 (при которой молекулы высвобождаются после разрушения кластеров и начинает индуцироваться сигнал на детекторе) молекулами поглощалось в среднем по 5–6 квантов излучения лазера, т.е. примерно по 0.6–0.7 эВ [33, 36]. Некоторые молекулы поглощали энергию, большую этой величины. Кроме того, охлажденные в пучке молекулы SF_6 имели кинетическую энергию около 0.16 эВ [18, 35]. Следовательно, суммарная энергия одиночной молекулы до столкновения с кластером аргона составляла 0.76–0.86 эВ. Захват колебательно-возбужденной молекулы SF_6 с энергией около 0.8–0.9 эВ способен привести к полному разрушению кластера аргона с числом атомов $N \leq 12$, а с учетом соотношений (3) и (4), возможно, и до $N \approx 20$. Если же из пересекающего молекулярного пучка кластерами захватывалось по две возбужденные молекулы (что весьма вероятно, поскольку нами использовался довольно интенсивный молекулярный пучок), то имело место разрушение кластеров с размерами вплоть до $N \sim 30{-}40$. В наших экспериментах, вероятно, реализовывались условия захвата кластерами преимущественно более одной молекулы SF_6, поскольку угол отклонения $\theta \approx 10^\circ$ соответствовал именно случаю захвата кластерами с $N \sim 30$ двух молекул SF_6.

Итак, в настоящей работе показано, что при столкновении колебательно-высоковозбужденных интенсивным ИК лазерным излучением молекул SF_6 (с колебательной энергией $E_{\mathrm{vib}} \geq (0.5{-}2)$ Дж/см^2) с кластерами Ar_N ($N \leq 30{-}40$) в пересекающихся кластерном и молекулярном пучках происходят захват молекул кластерами, полная дезинтеграция кластеров и высвобождение захваченных молекул. При небольших энергиях возбуждения освободившиеся молекулы имеют очень низкую кинетическую и внутреннюю энергию. Поэтому описанный процесс можно использовать для получения сильно “охлажденных” молекул.

Захват кластерами невозбужденных молекул SF_6 приводит к испарению 2–3 атомов аргона с поверхности кластера (за счет передачи кластерам кинетической энергии). Эти молекулы SF_6 уносятся кластерным пучком, в то время как освободившиеся после разрушения кластеров молекулы SF_6 имеют в лабораторной системе координат более широкую диаграмму направленности по сравнению с кластерным пучком. Последнее связано с довольно большим числом процессов отдачи энергии, испытываемых кластером при испарении атомов. В результате описанный эффект можно использовать для селективного допирования кластеров молекулами, лазерного разделения молекул по компонентному или изотопному составу, а также для селективной транспортировки молекул на поверхность.

Недостатком предложенного метода в плане реализации высокой селективности захвата молекул кластерами является принципиальная сложность возбуждения всех молекул в пучке [25], т.е. сложность реализации условий, при которых доля возбужденных молекул сопоставима с единицей не только в облучаемом лазером объеме импульсного молекулярного пучка, но и во всем “сгустке” пучка. Возбудить все молекулы в “сгустке” импульсного пучка можно лишь при использовании очень коротких импульсных молекулярных пучков (длительностью ≤ 20 мкс по полувысоте, когда протяженность молекулярного “сгустка” в пространстве составляет ≤ 1 см) и высоких плотностей энергии для их возбуждения. Такие условия были реализованы, например, в работах [42, 43].

Авторы выражают глубокую благодарность В.Н. Лохману за помощь в работе над рисунками. Работа частично поддержана Российским фондом фундаментальных исследований (грант #12-02-00401).

---

1. *Atomic and Molecular Beam Methods*, v. 2 (ed. by G. Scoles), Oxford University Press, N.Y., 1992.
2. H. Pauly, *Atom, Molecule, and Cluster Beams II, Cluster Beams, Fast and Slow Beams, Accessory Equipment and Applications*, Springer, N.Y., 2000.
3. C. T. Rettner, D. J. Auerbach, J. C. Tully, and A. W. Kleyn, J. Phys. Chem. **100**, 13021 (1996).
4. A. Perez, P. Melinon, V. Dupuis et al., J. Phys. D: Appl. Phys. **30**, 709 (1997).
5. S. Atrill and A. J. Stace, J. Chem. Phys. **108**, 1924 (1998).
6. J. M. Mestdagh, M. Berdah, N. Auby et al., Eur. Phys. J. D **4**, 291 (1998).
7. L. B. F. Juurlink, R. R. Smith, and A. L. Utz, J. Phys. Chem. B **104**, 3327 (2000).
8. J. F. Weaver, A. F. Carlsson, and R. J. Madix, Surf. Sci. Rep. **50**, 107 (2003).
9. R. R. Smith, D. R. Killelea, D. F. DelSesto, and A. L. Utz, Science **304**, 992 (2004).
10. A. M. Wodtke, H. Yuhui, and D. J. Auerbach, Chem. Phys. Lett. **413**, 326 (2005).
11. Г. Н. Макаров, УФН **176**, 121 (2006).
12. T. E. Gough, M. Mengel, P. A. Rowntree, and G. Scoles, J. Chem. Phys. **83**, 4958 (1985).
13. S. Goyal, D. L. Schutt, and G. Scoles, J. Chem. Phys. **102**, 2302 (1995).
14. K. K. Lehmann and G. Scoles, Sciense **279**, 2065 (1998).
15. J. P. Toennis, A. F. Vilesov, and K. B. Whaley, Physics Today **54**(2), 31 (2001).
16. Г. Н. Макаров, УФН **174**, 225 (2004).
17. J. P. Toennies and A. F. Vilesov, Angew. Chem. Int. Ed. **43**, 2622 (2004).
18. Г. Н. Макаров, УФН **176**, 1155 (2006).
19. J. M. Mestdagh, M. A. Gaveau, C. Gee et al., Int. Rev. Phys. Chem. **16**(2), 215 (1997).
20. Г. Н. Макаров, А. Н. Петин, Письма в ЖЭТФ **90**, 712 (2009).
21. G. N. Makarov and A. N. Petin, Chem. Phys. Lett. **484**(1–3), 14 (2009).
22. Г. Н. Макаров, А. Н. Петин, ЖЭТФ **137**, 646 (2010).
23. Г. Н. Макаров, УФН **181**, 3655 (2011).
24. G. N. Makarov and A. N. Petin, Laser Phys. **21**, 120 (2011).
25. Г. Н. Макаров, А. Н. Петин, Письма в ЖЭТФ **93**, 123 (2011).
26. J. Gspann, in: *Physics of Electronic and Atomic Collisions* (ed. by S. Datz), Amsterdam, N.-Y., Oxford: North-Holland, 1982, p. 79.
27. M. Lewerenz, B. Schilling, and J. P. Toennies, Chem. Phys. Lett. **206**, 381 (1993).
28. W. R. Gentry and C. F. Giese, Rev. Sci. Instrum. **49**, 595 (1978).
29. Г. Н. Макаров, А. Н. Петин, ЖЭТФ **134**, 851 (2008).
30. J. Farges, M. F. de Feraudy, B. Raoult, and G. Torchet, Surf. Sci. **106**(1–3), 95 (1981).
31. Г. Н. Макаров, УФН **178**, 337 (2008).
32. V. M. Apatin, L. M. Dorozhkin, G. N. Makarov, and L. M. Pleshkov, Appl. Phys. B **29**, 273 (1982).
33. В. М. Апатин, Г. Н. Макаров, ЖЭТФ **84**, 15 (1983).
34. R. S. McDowell, B. J. Krohn, H. Flicker, and M. C. Vasquez, Spectrochim. Acta A **42**, 351 (1986).
35. Г. Н. Макаров, УФН **173**, 913 (2003).
36. Г. Н. Макаров, УФН **175**, 41 (2005).
37. *Hadbook of Chemistry and Physics*, 74-th edition (ed. by D. R. Lide), CRC Press, Boca Raton, 1993–1994.
38. Б. М. Смирнов, УФН **171**, 1291 (2001).
39. S. A. Chin and E. Krotschek, Phys. Rev. B **52**, 10405 (1995).
40. A. Gross and R. D. Levinne, J. Phys. Chem. A **107**, 9567 (2003).
41. J. F. Winkel, C. A. Woodward, A. B. Jones, and A. J. Stace, J. Chem. Phys. **103**, 5177 (1995).
42. G. N. Makarov, D. E. Malinovsky, and D. D. Ogurok, Laser Chem. **17**(4), 205 (1998).
43. Г. Н. Макаров, Д. Е. Малиновский, Д. Д. Огурок, ЖТФ **69**(1), 35 (1999).