

Исследование процессов ионизации кластеров Ar_n , $(H_2O)_n$, $Ar_n(H_2O)_m$ электронным ударом

© М.А. Ходорковский,¹ Т.О. Артамонова,¹ С.В. Мурашов,² D. Michael,³ Л.П. Ракчеева,¹ А.А. Беляева,¹ Н.А. Тимофеев,² А.С. Мельников,² А.Л. Шахмин,¹ И.А. Дементьев²

¹ Российский научный центр „Прикладная химия“,
197198 Санкт-Петербург, Россия

² Санкт-Петербургский государственный университет,
198904 Санкт-Петербург, Россия

³ General Electric Global Research Center, Niskayuna,
12309, New York USA

e-mail: mkhodorkovskii@rscac.spb.ru

(Поступило в Редакцию 29 октября 2007 г.)

Измерены зависимости интенсивности ионов, формирующихся в смеси аргона с парами воды в сверхзвуковом молекулярном пучке, от энергии возбуждающих электронов в области до 120 eV. Впервые измерены пороги появления кластеров $(H_2O)_{n-1}H^+$, $Ar_n(H_2O)_m^+$ электронным ударом. Установлено, что энергия связи протона с гидроксильной группой существенно понижается как при переходе молекул воды в кластеры, так и в случае образования смешанных кластеров $Ar_n(H_2O)_m$.

PACS: 36.40.-c, 34.80.Gs

Введение

В нашей работе [1] был исследован состав сверхзвукового молекулярного пучка (СМП) смеси аргона и паров воды методом масс-спектрометрии. Было показано, что состав пучка зависит не только от газодинамических параметров пучка и парциального давления компонент исходной смеси, но также от способа приготовления этой смеси. При определенных условиях смешения аргона и паров воды можно сформировать пучок с большим или меньшим содержанием кластеров воды или кластеров аргона и смешанных кластеров. Наиболее удивительный результат, полученный в работе [1], заключается в том, что увеличение концентрации кластеров воды в молекулярном пучке может быть достигнуто как увеличением парциального давления водяных паров в исходной смеси, так и путем напуска аргона в камеру, содержащую водяной пар. В случае напуска водяного пара в камеру с аргоном концентрации водных кластеров уменьшались, а смешанных кластеров, таких как $Ar_n(H_2O)_m$, увеличивались.

Изучение зависимости состава пучка от способа приготовления смеси было обусловлено результатами исследований плазменного разряда в смеси аргона с парами воды [2–4]. В этих работах было показано, что интенсивность излучения радикалов OH (306.4 nm) зависит от концентрации паров воды в исходной смеси и способа приготовления смеси. Например, можно так приготовить рабочую смесь, что излучение разряда будет в основном определяться очень интенсивной линией OH 306.4 nm, а линии аргона будут слабыми [3]. В связи с этим представляет интерес изучение процессов ионизации при столкновении электронов с компонентами рабочей смеси. Результаты взаимодействия электронов с атомами инертных газов и молекулами воды хорошо известны [5],

а данных о взаимодействии электронов с их кластерами в известной нам литературе очень мало.

Целью настоящей работы является исследование процессов ионизации электронным ударом кластеров аргона Ar_n , воды $(H_2O)_m$ и смешанных кластеров $Ar_n(H_2O)_m$, формирующихся в смеси аргона с парами воды в сверхзвуковом молекулярном пучке.

Экспериментальная установка

В работе использовалась экспериментальная установка со сверхзвуковым импульсным молекулярным пучком, описанная в работе [1]. Для формирования и регистрации сверхзвукового молекулярного пучка использовались три камеры. Газовая смесь паров воды и аргона с предельным давлением 10 bar готовилась различными способами в первой камере и затем подавалась через сверхзвуковое импульсное сопло во вторую камеру, откачанную до давления 10^{-8} Torr. Длительность импульса молекулярного пучка составляла 0.2–10 ms. Далее молекулярный пучок через скиммер попадал в следующую камеру, оборудованную квадрупольным масс-спектрометром фирмы Balzers (Швейцария), имеющим область регистрации масс до 2000 u и в разрушающую способность по массам ~ 500 . Погрешность при измерении значений ионных сигналов составляет примерно 5%.

В зоне пересечения молекулярного и электронного пучков в ионизационной головке квадрупольного масс-спектрометра формировались ионы исходных частиц (прямые ионы) и ионы, образующиеся в результате диссоциативной ионизации (фрагментные ионы). Плотность потока электронов при токе электронной пушки $10 \mu A$ и напряжении 50 eV составляет примерно 10^7 cm^{-3} .

Порядок величины сечений ионизации атомов и молекул при электронном ударе не превышает 10^{-16} cm^2 . Можно утверждать, что после столкновения частиц молекулярного пучка с электронами дополнительные столкновения между частицами пучка отсутствуют.

В условиях сверхзвукового молекулярного пучка концентрация частиц не превышает 10^{11} cm^{-3} , газовая температура составляет 10–20 К. Время пролета частиц через установку (от сопла до детектора) не превышает 100 μs . Время между столкновениями частиц в данных условиях не менее 10 ns. Таким образом, в условиях настоящей работы реализуется случай однократных столкновений частиц в пучке.

При установке масс-спектрометра в режим регистрации выбранной массы проводилось измерение временной зависимости интенсивности ионного сигнала (T -формы). Как было показано ранее [1], с помощью T -формы ионного сигнала в случае фрагментного иона можно судить о том, какая материнская молекула является исходной для наблюдаемого фрагмента. Для измерения временных зависимостей использовался аналого-цифровой преобразователь (АЦП) с временным разрешением 25 ns в режиме накопления. Измерения зависимости интенсивности ионных сигналов от энергии возбуждающих электронов проводились в диапазоне энергий 10–120 eV с шагом изменения энергии электронов 0.5 eV. Для определения порогов появления прямых и фрагментных ионов проводились измерения ионных сигналов в диапазоне припороговых энергий с большим временем накопления и последующей экстраполяцией получаемых значений.

Результаты и их обсуждение

Процессы ионизации комплексов аргона

На рис. 1 представлены зависимости интенсивностей ионов Ar_n^+ ($m = 1-4$) от энергии возбуждающих электронов в области до 120 eV. Как видно из этого рисунка, по мере увеличения размера кластера вид зависимостей заметно изменяется. В области 30–40 eV по мере роста n появляется достаточно узкий максимум, энергетическое положение которого смещается в область меньших энергий, а его ширина уменьшается.

Для корректного описания полученных результатов следует иметь в виду, что атомы аргона и малые кластеры могут попадать в зону регистрации не только непосредственно из смеси, но также за счет испарения их с больших кластеров за время движения последних в ионизационную головку масс-спектрометра. В таком случае вклад в измеряемый сигнал дают как исходные ионы, так и фрагментные ионы, получаемые в результате диссоциативной ионизации кластеров больших размеров, т. е.

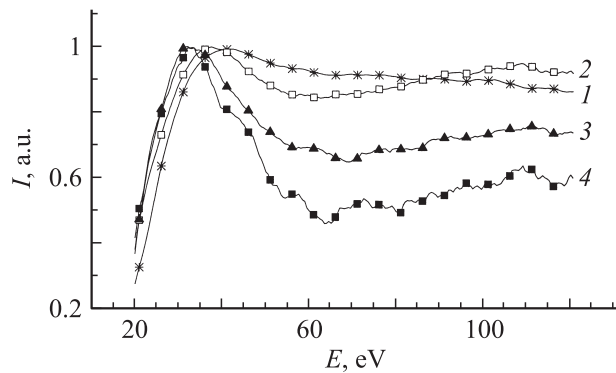
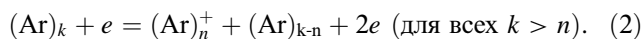
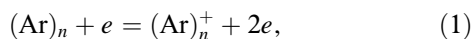


Рис. 1. Зависимости интенсивности ионов Ar_n^+ ($n = 1-4$), образовавшихся в сверхзвуковом молекулярном пучке, от энергии возбуждающих электронов. Кривые нормированы на единицу в максимуме 1 — Ar^+ , 2 — Ar_2^+ , 3 — Ar_3^+ , 4 — Ar_4^+ .

Так как вклад фрагментных ионов в измеряемый сигнал зависит от сечения диссоциативной ионизации и количества кластеров большого размера, естественно ожидать изменения энергетической зависимости интенсивности ионов Ar_n^+ ($n = 1-k$) от степени кластеризации молекулярного пучка.

На рис. 2 приведены зависимости интенсивности ионов Ar^+ , образовавшихся в сверхзвуковом молекулярном пучке с различным содержанием кластеров аргона, от энергии возбуждающих электронов. Для пучка, состоящего только из атомов аргона, приведена зависимость полного сечения ионизации Ar от энергии ударяющих электронов [5]. Все кривые нормированы на единицу при 90 eV, поскольку сечение ионизации Ar имеет максимум при этом значении энергии [5]. Как видно из рис. 2, на кривых энергетических зависимостей интенсивностей ионов Ar^+ , образовавшихся в сверхзвуковом кластиро-

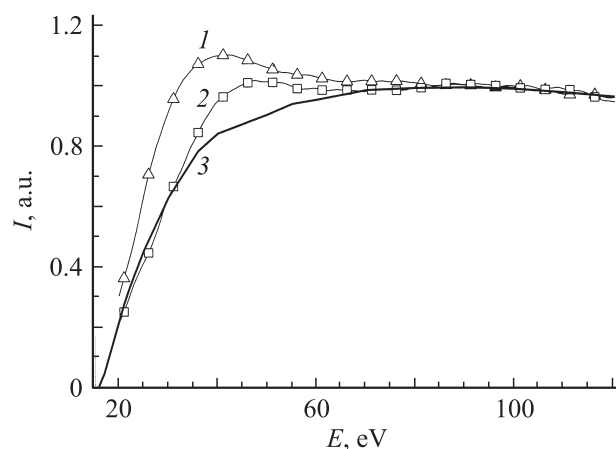


Рис. 2. Зависимости интенсивности ионов Ar^+ , образовавшихся в сверхзвуковом молекулярном пучке, от энергии возбуждающих электронов. Кривая 1 — пучок содержит большие кластеры аргона, 2 — пучок содержит малые кластеры аргона, 3 — пучок состоит только из атомов аргона [5]. Кривые нормированы на единицу при 90 eV.

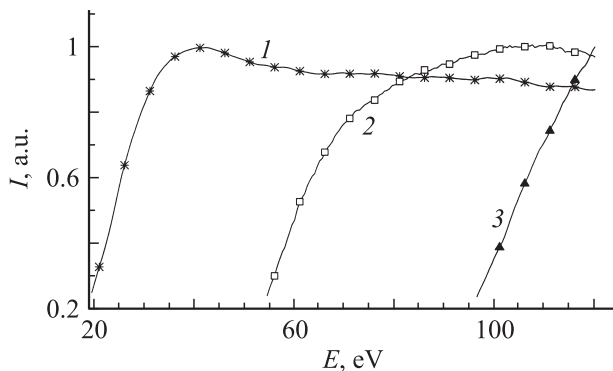


Рис. 3. Зависимости интенсивности ионов Ar^+ (1), Ar^{2+} (2), Ar^{3+} (3), образовавшихся в сверхзвуковом молекулярном пучке с большим содержанием кластеров, от энергии возбуждающих электронов. Кривые нормированы на единицу в максимуме.

ванном молекулярном пучке, наблюдается максимум в области энергий 30–50 eV, тогда как для пучка, содержащего только атомы аргона, кривая таких особенностей не имеет. Наличие максимума в области низких энергий свидетельствует о том, что вклад диссоциативной ионизации кластеров в измеряемую интенсивность Ar^+ весьма заметен. По энергетическому положению этот максимум близок к максимуму, наблюдающемуся для Ar_n^+ (см. рис. 1).

Интересно отметить, что на аналогичных кривых для Ar^{2+} (рис. 3) не наблюдается того характерного максимума в области малых энергий электронов, который так ярко выражен для ионов однократной ионизации Ar^+ . По-видимому, процесс диссоциативной ионизации кластеров аргона с образованием ионов Ar^{2+} маловероятен в связи с возможностью переноса заряда внутри кластера.

В настоящей работе были измерены пороги появления ионов атомов и малых кластеров аргона, их значения приведены в табл. 1. Как видно из таблицы, пороги появления этих ионов практически совпадают друг с другом. Порог появления ионов Ar^+ в пределах погрешности эксперимента совпадает с потенциалом ионизации атомов аргона 15.76 eV [5], а пороги появления ионов Ar_2^+ , Ar_3^+ хорошо совпадают с измеренными ранее в работе [4].

Таблица 1. Пороги появления ионов Ar^+ , Ar_2^+ , Ar_3^+ в сверхзвуковом молекулярном пучке

Ион	E, eV	
	Настоящая работа	[4]
Ar^+	16.0 ± 0.5	16.0 ± 0.3
Ar_2^+	16.2 ± 0.3	16.2 ± 0.3
Ar_3^+	16.2 ± 0.3	16.4 ± 0.3

Процессы ионизации кластеров молекул воды $(H_2O)_n$

Зависимости интенсивностей ионов молекул воды, их фрагментов, а также кластеров воды, измеренные для случая сильно кластеризованного молекулярного пучка, от энергии возбуждающих электронов приведены на рис. 4. На рис. 4, а кроме измеренных энергетических зависимостей интенсивностей H_2O^+ и OH^+ приведены зависимости парциальных сечений ионизации молекул H_2O электронным ударом с образованием H_2O^+ и OH^+ [5]. Видно, что зависимости интенсивностей H_2O^+ от энергии возбуждающих электронов в случаях кластеризованного и мономолекулярного пучков практически совпадают, тогда как для ионов OH^+ наблюдается небольшое различие.

На рис. 4, б приведены зависимости интенсивностей протонированных ионов $(H_2O)_{n-1}H^+$, образующихся в результате диссоциативной ионизации кластеров воды, от энергии возбуждающих электронов. Как показано в работе [1], интенсивность протонированных ионов кластеров воды $(H_2O)_{n-1}H^+$ как минимум на порядок

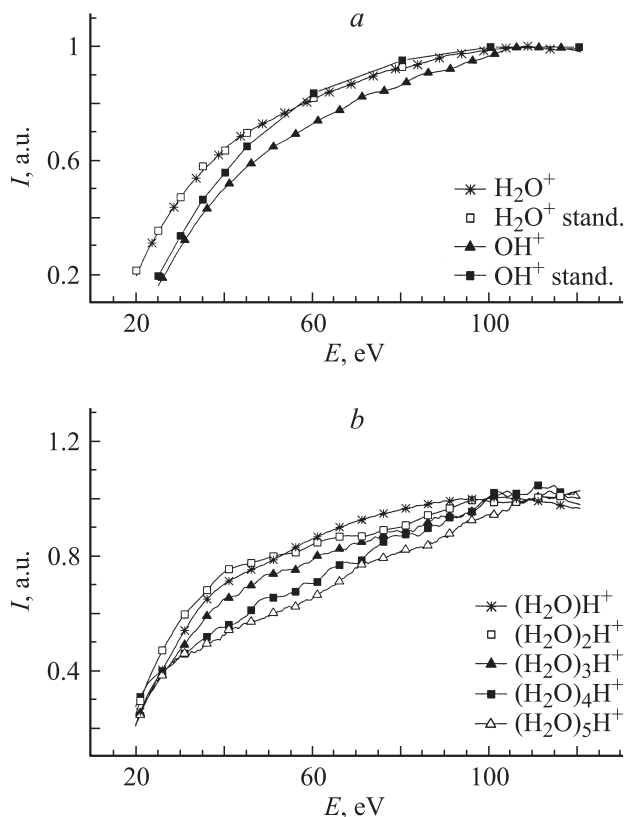
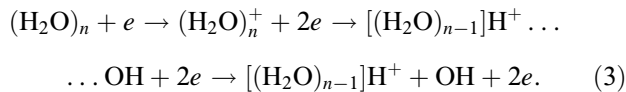
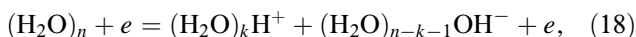
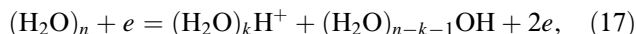
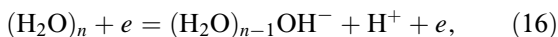
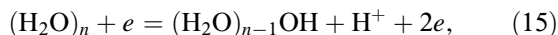
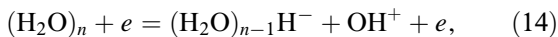
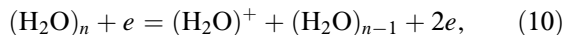
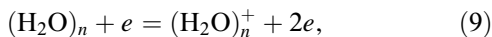
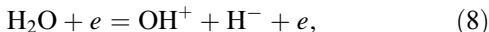
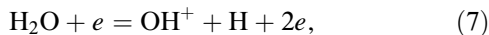
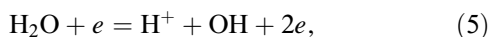
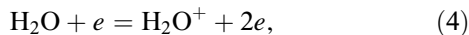


Рис. 4. Зависимости интенсивности ионов H_2O^+ , OH^+ , $(H_2O)_nH^+$ ($n = 1-5$), образовавшихся в сверхзвуковом молекулярном пучке, от энергии возбуждающих электронов. Для сравнения приведены зависимости парциальных сечений ионизации H_2O электронным ударом с образованием H_2O^+ и OH^+ (stand.) [5]. Кривые нормированы на единицу в максимуме.

превышает интенсивность материнских молекулярных ионов $(\text{H}_2\text{O})_2^+$. Хорошо известно [6–9], что при взаимодействии кластеров воды с электронами вследствие быстрой внутримолекулярной перестройки иона $(\text{H}_2\text{O})_n^+$ процесс отрыва OH -радикала с переносом заряда весьма эффективен, и как следствие в эксперименте регистрируются в основном протонированные ионы, т. е.



Для анализа полученных данных следует рассмотреть некоторые возможные каналы реакций образования положительных ионов при взаимодействии электронов с молекулами и кластерами воды



где в выражениях (17), (18) k может принимать значения от 1 до $n - 2$.

Как видно из приведенных выражений, при измерении интенсивностей сигналов положительных ионов H_2O^+ , OH^+ и H^+ необходимо учитывать, что они могут быть образованы как в результате прямой ионизации (4)–(8), так и диссоциативной ионизации кластеров (10), (13)–(16). В связи с этим необходимо сравнить T -формы измеряемых сигналов для ионов с определенной массой для последующего отнесения их к той или иной родительской частице.

На рис. 5 приведены T -формы для ионов H_2O^+ , OH^+ и H^+ в молекулярном пучке с большим содержанием кластеров воды. Вид T -форм для этих ионов практически совпадает друг с другом. Как было показано ранее [1], в этом случае ионы H_2O^+ , OH^+ и H^+ формируются при соударении электронов с нейтральными молекулами воды в реакциях (4)–(8), а упоминавшееся выше

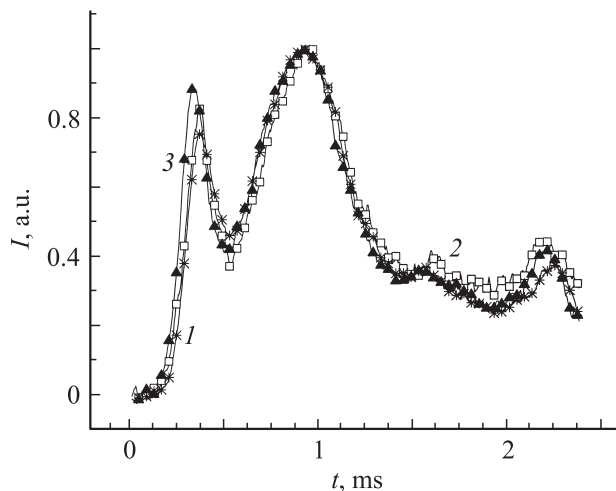


Рис. 5. Временные зависимости интенсивности ионов H_2O^+ (1), OH^+ (2) и H^+ (3), образовавшихся в сверхзвуковом молекулярном пучке с большим содержанием кластеров воды электронным ударом. Кривые нормированы на единицу в максимуме.

небольшое различие в энергетических зависимостях интенсивности ионов OH^+ для кластеризованного и мономолекулярного пучков может свидетельствовать о дополнительном вкладе в интенсивность от диссоциативной ионизации кластеров воды — реакции (13), (14).

В табл. 2 приведены пороги появления ионов молекул воды, кластеров воды и их фрагментов, измеренные в настоящей работе и известные из литературы. Насколько нам известно, экспериментальные данные о порогах появления ионов кластеров воды, кроме димера $(\text{H}_2\text{O})_2$, в литературе отсутствуют. Пороги появления ионов $(\text{H}_2\text{O})_2^+$ и протонированных ионов $(\text{H}_2\text{O})\text{H}^+$ были измерены в работе [10] методом фотоионизации, а в работе [11] были рассчитаны первые вертикальные энергии ионизации кластеров $(\text{H}_2\text{O})_n$ для $n = 1-8$.

Измеренные в настоящей работе пороги появления ионов H_2O^+ , OH^+ , H^+ и $(\text{H}_2\text{O})\text{H}^+$ отличаются от литературных значений [5,12] в среднем на $\Delta \approx 3$ eV. Такую значительную разницу можно объяснить экспериментальной особенностью регистрации сигнала в случае молекулярного пучка, обогащенного парами воды. По-видимому, в этом случае водный слой покрывает регистрирующие поверхности ионизационной головки квадрупольного масс-спектрометра и создает дополнительное паразитное сопротивление. Можно считать, что истинные значения порогов появления всех ионов примерно на $\Delta \approx 3$ eV меньше измеренных. В табл. 2 приведены значения порогов появления ионов с учетом этой систематической ошибки. Из таблицы видно, что потенциал ионизации димера воды $(\text{H}_2\text{O})_2^+$, измеренный в [10], на 0.67 eV отличается от рассчитанного в [11] и только на 0.5 eV — от порога появления протонированного иона $(\text{H}_2\text{O})\text{H}^+$ [10]. На этом основа-

Таблица 2. Пороги появления ионов молекул и кластеров воды и их фрагментов

Материнская молекула	Ион	Порог появления, eV (настоящая работа)	Порог появления, eV [5,10–12]
H_2O	H_2O^+	12 ± 0.5	12.61 [5]
	OH^+	18 ± 0.5	18.34* [12]
	H^+	19.5 ± 0.5	18.76* [12]
$(H_2O)_2$	$(H_2O)_2^+$	–	11.21 ± 0.09 [10] 11.88 [11]
	$(H_2O)H^+$	12 ± 0.5	11.73 ± 0.03 [10]
$(H_2O)_3$	$(H_2O)_3^+$		<i>a</i> 11.93** <i>b</i> 10.45**
	$(H_2O)_2H^+$	12 ± 0.5	
$(H_2O)_4$	$(H_2O)_4^+$		<i>a</i> 11.55** [11] <i>b</i> 10.62**
	$(H_2O)_3H^+$	12 ± 0.5	
$(H_2O)_5$	$(H_2O)_5^+$		<i>a</i> 11.31** [11] <i>b</i> 11.24**
	$(H_2O)_4H^+$	12 ± 0.5	
$(H_2O)_6$	$(H_2O)_6^+$		<i>a</i> 11.40** [11] <i>b</i> 9.87**
	$(H_2O)_5H^+$	12 ± 0.5	

* Пороги появления ионов H^+ и OH^+ , рассчитанные по энергии диссоциации молекулы H_2O и энергии ионизации атома H и радикала OH соответственно.

** Расчет потенциалов ионизации для двух изомеров *a*, *b*.

нии можно предположить, что пороги появления ионов $(H_2O)_{n-1}H^+$ также незначительно будут отличаться от порогов появления ионов $(H_2O)_n^+$ ($n \geq 3$). Также видно, что пороги появления $(H_2O)_{n-1}H^+$, измеренные в настоящей работе, для всех $n = 2-6$ достаточно хорошо согласуются с расчетными значениями для *a*-изомера $(H_2O)_n^+$ [11].

Следует обратить внимание на тот факт, что при диссоциативной ионизации кластеров воды (реакция (11)) требуется затратить энергии на 7 eV меньше, чем при диссоциативной ионизации молекул H_2O (5). Полученный результат столь разных порогов появления протона и протонированного кластера свидетельствует о том, что энергия связи протона с гидроксильной группой существенно понижается при переходе молекул воды в кластеры.

Процессы ионизации смешанных кластеров $Ar_n(H_2O)_m$

На рис. 6 приведены зависимости интенсивности ионов Ar^+ , Ar_2^+ , ArH^+ , $ArOH^+$, ArH_2O^+ , $Ar_2(H_2O)^+$, $Ar_2(H_2O)H^+$, образовавшихся в сверхзвуковом молекулярном пучке электронным ударом, от энергии возбуждающих электронов. Как видно из этого рисунка, энергетическая зависимость интенсивности всех ионов, за исключением ArH^+ и Ar_2H^+ , близка по виду к энергетической зависимости интенсивности ионов Ar^+

и Ar_2^+ . На этом основании можно предположить, что для ионов $ArOH^+$, ArH_2O^+ , $Ar_2(H_2O)^+$, $Ar_2(H_2O)H^+$ родительскими частицами являются смешанные кластеры, образованные путем прилипания молекул воды к атомам и димерам аргона, а не молекулы и димеры воды с адсорбированными на них атомами аргона. Последнее утверждение следует подчеркнуть, так как один и тот же комплекс, например Ar_2H_2O , может иметь различную структуру, а именно $(Ar-Ar)-H_2O$, где к димеру аргона присоединяется молекула воды, или $Ar-H_2O-Ar$, где атомы аргона будут связаны через молекулу воды. Электронное строение этих комплексов должно существенно отличаться друг от друга, что может приводить к различным сечениям их ионизации.

Приведенные соображения подтверждаются и видом *T*-форм, представленных на рис. 7. Наиболее контрастно это видно на рис. 7, *b*, где *T*-формы ионов $Ar_2H_2O^+$ и Ar_2H^+ близки к *T*-формам ионов димера и тримера аргона. Если бы образование материнских смешанных кластеров для этих ионов происходило за счет прилипания атомов аргона к молекулам воды, то их *T*-форма была бы скорее всего близка к *T*-форме ионов H_2O^+ (см. рис. 5), но, как видно из этих рисунков, *T*-формы ионов смешанных кластеров и их производных кардинально отличаются от *T*-форм молекул воды. *T*-формы ионов ArH_2O^+ и ArH^+ близки друг другу и следовательно, для фрагментного иона ArH^+ материнской молекулой можно считать молекулу ArH_2O .

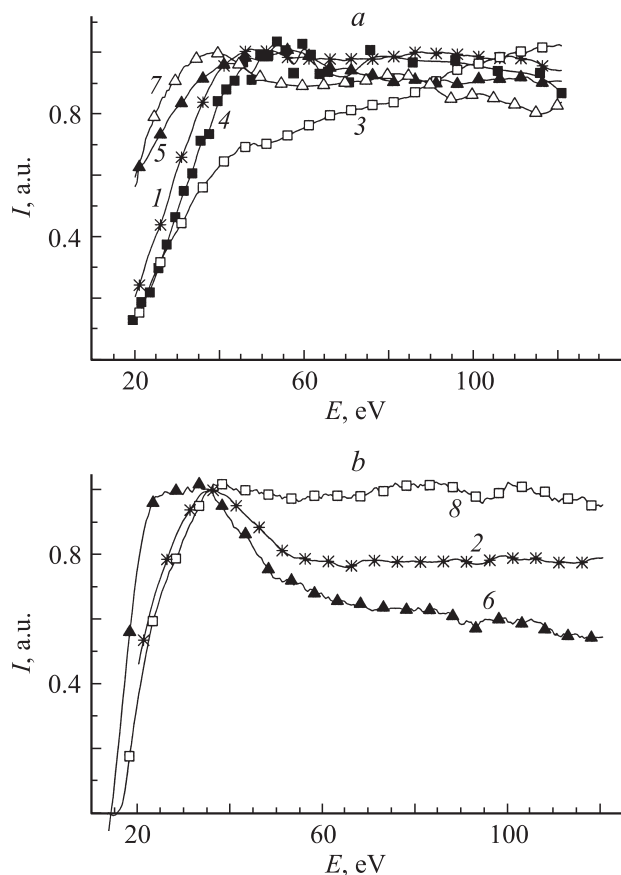


Рис. 6. Зависимости интенсивности ионов Ar^+ (1), Ar_2^+ (2), ArH^+ (3), ArOH^+ (4), ArH_2O^+ (5), $\text{Ar}_2(\text{H}_2\text{O})^+$ (6), $\text{Ar}_2(\text{H}_2\text{O})\text{H}^+$ (7), Ar_2H^+ (8), образовавшихся в сверхзвуковом молекулярном пучке, от энергии возбуждающих электронов. Кривые нормированы на единицу в максимуме.

В табл. 3 приведены пороги появления смешанных ионов, измеренные в настоящей работе с учетом систематической ошибки $\Delta \approx 3 \text{ eV}$ (см. пояснение к табл. 2). Как видно из табл. 2 и 3, при диссоциативной ионизации отрыв гидроксильной группы от смешанных кластеров (порог появления ArH^+ и $\text{Ar}(\text{H}_2\text{O})\text{H}^+$) происходит при меньших энергиях электронов, чем отрыв OH от молекулы H_2O (порог появления H^+). Как и в случае водных кластеров, в случае смешанных кластеров гра-

Таблица 3. Пороги появления ионов смешанных кластеров

Ион	Порог появления иона $E, \text{ eV}$
$\text{Ar}(\text{H}_2\text{O})^+$	13.5
ArH^+	< 15
$\text{Ar}(\text{OH})^+$	< 15
$\text{Ar}(\text{H}_2\text{O})\text{H}^+$	< 15
$\text{Ar}_2(\text{H}_2\text{O})^+$	< 15.5
Ar_2H^+	< 16

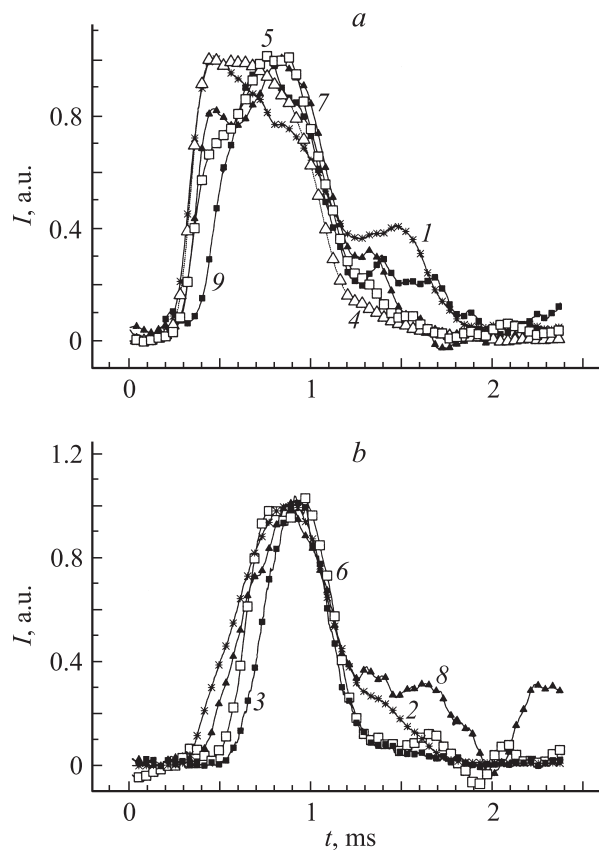


Рис. 7. Временные зависимости интенсивности ионов Ar^+ (1), Ar_2^+ (2), Ar_3^+ (3), H_2O^+ (4), ArH^+ (5), Ar_2H^+ (6), $\text{Ar}_2(\text{H}_2\text{O})^+$ (7), $\text{Ar}_2(\text{H}_2\text{O})\text{H}^+$ (8), $\text{Ar}(\text{H}_2\text{O})\text{H}^+$ (9), образовавшихся в сверхзвуковом молекулярном пучке, от энергии возбуждающих электронов. Кривые нормированы на единицу в максимуме.

ница диссоциативной ионизации кластеров с отрывом OH -радикалов понижается, хотя и в меньшей степени.

Заключение

Исследованы процессы взаимодействия электронов с компонентами сверхзвукового молекулярного пучка, молекул и кластеров воды, атомов и кластеров аргона, а также смешанных кластеров воды и аргона. Получены зависимости интенсивности ионов H_2O^+ , OH^+ , $(\text{H}_2\text{O})_{n-1}\text{H}^+$, $\text{Ar}_n(\text{H}_2\text{O})_m^+$ и их фрагментов от энергии возбуждающих электронов в области до 120 eV. Впервые были измерены потенциалы появления протонированных ионов из кластеров воды $(\text{H}_2\text{O})_n$ и из смешанных кластеров $\text{Ar}_n(\text{H}_2\text{O})_m$ электронным ударом. При этом установлено, что энергия связи протона с гидроксильной группой существенно понижается как при переходе молекул воды в кластеры, так и в случае образования смешанных кластеров $\text{Ar}_n(\text{H}_2\text{O})_m$.

Совокупность полученных результатов позволяет сделать вывод о значительном влиянии различного вида

кластеров на процессы ионизации в газовом разряде на смеси аргона с парами воды.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проекты № 06-02-17326, 08-02-00966).

Список литературы

- [1] Ходорковский М.А., Артамонова Т.О., Мурашов С.В. и др. // ЖТФ 2007. Т. 77. Вып. 10. С. 22–29.
- [2] Миленин В.М., Тимофеев Н.А., Ходорковский М.А. и др. // Письма в ЖТФ. 2000. Т. 26. Вып. 18. С. 63–67.
- [3] Вуль А.Я., Кудалов С.В., Ходорковский М.А. и др. // Письма в ЖТФ. 1999. Т. 25. Вып. 8. С. 62–64.
- [4] Zvilopulo A.N., Dolgin A.I., Khodorkovskii M.A. // Phys. Scripta. 1994. Vol. 50. P. 696–700.
- [5] Авакян С.В., Ильин Р.Н., Лавров В.М. и др. Сечения процессов ионизации и возбуждения УФ излучения при столкновениях электронов, ионов и фотонов с атомами и молекулами атмосферных газов. Справочник. СПб., 2000. 365 с.
- [6] Nagashima U., Shinohara H., Nishi N. et al. // J. Chem. Phys. 1986. Vol. 84. N 1. P. 209–213.
- [7] Huisken F., Kaloudis M., Kulcke A. // J. Chem. Phys. 1996. Vol. 104. N 1. P. 17–25.
- [8] Buck U., Winter M.Z. // Phys. D. 1994. Vol. 31. P. 291–297.
- [9] Shhinhohara H., Nishi N., Washida N. // J. Chem. Phys. 1986. Vol. 84. N 10. P. 5561–5567.
- [10] Ng C.Y., Trevor D.J., Tiedeman P.W. et al. // J. Chem. Phys. 1977. Vol. 67. N 9. P. 4235–4237.
- [11] Tomoda S., Kimura K. // Chem. Phys. Lett. 1983. Vol. 102. N 6. P. 560–564.
- [12] Гурвич Л.В., Караченцев Г.В., Кондратьев В.Н. и др. Энергия разрыва химических связей. Потенциалы ионизации и сродство к электрону. М., 1974. 351 с.