

02

Процессы захвата и диссоциативного захвата одного электрона при взаимодействии двухзарядных ионов с молекулами CO

© А.А. Басалаев,¹ В.В. Кузьмичев,^{1,2} М.Н. Панов,¹ О.В. Смирнов^{1,3}

¹Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН,
194021 Санкт-Петербург, Россия

²Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого,
194064 Санкт-Петербург, Россия

³Санкт-Петербургский Академический университет — научно-образовательный центр нанотехнологий РАН,
195220 Санкт-Петербург, Россия
e-mail: a.basalaev@mail.ioffe.ru

Поступило в Редакцию 8 февраля 2018 г.

В окончательной редакции 28 ноября 2018 г.

Принято к публикации 4 марта 2019 г.

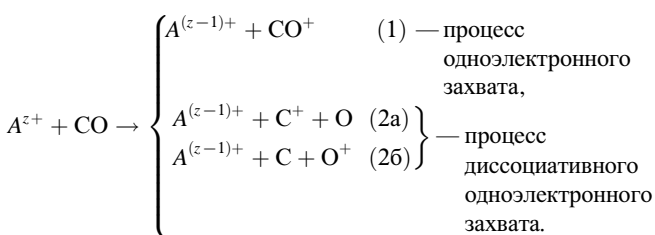
Измерены абсолютные величины сечений процессов одноэлектронного захвата и одноэлектронного захвата с диссоциацией при взаимодействии ионов He^{2+} , C^{2+} , N^{2+} и O^{2+} с молекулой CO в диапазоне энергий налетающих ионов от 6.4 до 36.4 keV. Обнаружено, что для иона-снаряда O^{2+} сечение процесса диссоциативного захвата существенно больше, чем сечение процесса одноэлектронного захвата. Дано качественное объяснение этого эффекта.

Ключевые слова: двухзарядные ионы, захват одного электрона, диссоциация однозарядных молекулярных ионов атмосферных газов.

DOI: 10.21883/JTF.2019.08.47886.53-18

Введение

При медленных ион-молекулярных столкновениях, когда скорость налетающего иона V_p меньше скорости валентных электронов молекулы-мишени, основным по величине сечения процессом изменения зарядового состояния сталкивающихся частиц является процесс захвата одного электрона (процессы (1) и (2)), например, [1,2] и ссылки в них. Сечение процесса диссоциативного захвата одного электрона у молекул CO, в результате которого образуется либо ион C^+ и атом O (процесс (2a)), либо ион O^+ и атом C (процесс (2б)) при взаимодействии с ионами H^+ (в области скоростей сближения частиц $V_p < 1$ а.е.) [3,4], Ar^+ ($V_p = 0.08-0.19$ а.е.), Kr^+ ($V_p = 0.05-0.11$ а.е.) и Xe^+ ($V_p = 0.04-0.07$ а.е.) [5], а так же с ионами He^{2+} ($V_p < 1$ а.е.) [4] составляет примерно 15% от сечения процесса одноэлектронного захвата (процесс 1), в котором образуется ион CO^+ . Этот результат хорошо согласуется с аналогичными данными по ионизации молекулы CO электронами с энергией от 40 до 600 eV [6,7]. Однако при столкновении ионов Ne^+ ($V_p = 0.1-0.3$ а.е.) с молекулами CO сечение процесса (1) примерно в 2 раза меньше сечения процесса диссоциативного захвата [8].



Характерная особенность процесса захвата одного электрона заключается в том, что он эффективно происходит при больших параметрах удара, т.е. при малых углах рассеяния налетающего иона. Величина дифференциального сечения захвата одного электрона при столкновении ионов H^+ и He^{2+} с атомами аргона [9,10] и ионов H^+ с молекулами CO и CO_2 [11] при углах рассеяния налетающей частицы $E\theta = 3 \text{ keV} \cdot \text{deg}$ (где θ — угол рассеяния налетающего иона в лабораторной системе координат, E — энергия налетающего иона) падает примерно на 3 порядка. Процесс диссоциативного одноэлектронного захвата при таких углах рассеяния налетающей частицы обусловлен изменением внутренней энергии сталкивающихся частиц, а не кинетической энергией, переданной налетающим ионом атомам, входящим в состав молекулы CO, которая среди двухатомных молекул имеет самую большую энергию диссоциации в основном состоянии CO ($X^1\Sigma^+$) $D_0 = 11.11 \text{ eV}$, а в ионизированном CO^+ ($X^2\Sigma^+$) $D_0 = 8.37 \text{ eV}$, уступая только молекулярному иону N_2^+ ($X^2\Sigma^+$) $D_0 = 8.73 \text{ eV}$ [12].

Целью настоящей работы было измерение абсолютных величин сечений одноэлектронного захвата и диссоциативного электронного захвата для ион-молекулярных систем $A^{2+} + \text{CO}$, в которых предполагалась значительная роль процесса диссоциативного захвата.

Методика эксперимента

Для проведения измерений была использована экспериментальная методика, разработанная для исследования фрагментации ионов многоатомных молекул.

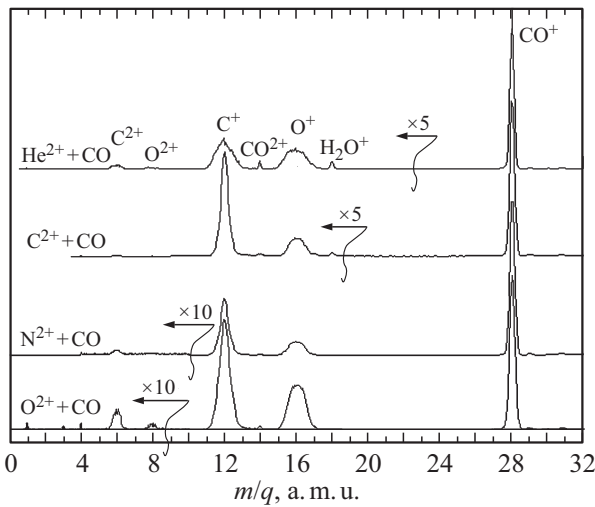


Рис. 1. Типичные масс-спектры, сформированные процессами захвата одного электрона, в которых образовался только один ион отдачи. Все спектры нормированы на один и тот же интеграл пика CO^+ . Для систем $\text{He}^{2+} + \text{CO}$ и $\text{C}^{2+} + \text{CO}$ области масс-спектров с $m/q < 19$ умножены на 5, для систем $\text{N}^{2+} + \text{CO}$ и $\text{O}^{2+} + \text{CO}$ области масс-спектров с $m/q < 10$ умножены на 10.

кул [13] Хорошо коллимированный ($\text{FWHM} = 8'$) монокинетический пучок двухзарядных ионов с энергией $E_p = 6.4\text{--}36.4\text{ keV}$ пересекал эффузионную струю молекул CO. Пересечение ионного пучка и молекулярной струи происходило в области однородного электрического поля вытягивающего конденсатора, которое направляло ионы отдачи, образовавшиеся в газе-мишени, в ионно-оптическую систему времяпролетного масс-анализатора. Эти ионы, пройдя оптическую систему масс-анализатора, имели энергию $4q\text{ keV}$, где q — заряд иона отдачи, и дополнительно ускорялись напряжением 14 kV , после чего регистрировались детектором в счетном режиме. Благодаря дополнительному ускорению достигалась высокая и практически одинаковая эффективность регистрации ионов различной массы и заряда.

Зарядовое состояние налетающих ионов, рассеянных в диапазоне углов $\theta = \pm 1.5^\circ$, после взаимодействия определялось электростатическим анализатором. Импульсы детектора налетающих ионов A^+ , образовавшихся после захвата одного электрона двухзарядными ионами A^{2+} (A — атомы He, C, N и O), использовались в качестве стартового сигнала регистрирующей системы. Сигналы детектора времяпролетного масс-спектрометра регистрировались в „многоstopовом“ режиме, т. е. в режиме, позволяющем зафиксировать разницу времени между стартовым сигналом и временами детектирования всех зарегистрированных ионов-фрагментов. Масс-спектрометр обеспечивал полный сбор ионов-фрагментов с начальными энергиями от 0 до 9 eV .

Определение относительных величин сечений процессов одноэлектронного захвата и диссоциативного одноэлектронного захвата проводилось на основе анализа масс-спектров, обусловленных процессами, в которых

образовались либо молекулярный ион, либо один заряженный атомарный фрагмент (рис. 1). Таким образом, были разделены процессы одноэлектронного захвата (образовался только один заряженный фрагмент) и захвата электрона с ионизацией (образовались два заряженных фрагмента или двухзарядные ионы CO^{2+} , C^{2+} , O^{2+}). Для получения величин относительных сечений проводилось интегрирование соответствующих пиков в масс-спектрах и их нормирование на интеграл тока пучка налетающих ионов. Измерения для различных налетающих ионов проводились при неизменном потоке газа-мишени, поэтому полученные величины относительных сечений для всех налетающих ионов были в одинаковых относительных единицах.

Определение абсолютных величин сечений требуют измерения плотности и протяженности струйной молекулярной мишени, что было выполнено с помощью процедуры нормировки измеренного относительного сечения образования ионов CO^+ при взаимодействии ионов H^+ (протонов) с молекулами CO на абсолютное сечение этого процесса, приведенное в работе [3]. Экспериментальные ошибки определения относительных сечений определялись по результатам многократных измерений и не превышали $\pm 2\%$. Таким образом, ошибка в определении сечений определялась точностью абсолютной калибровки $\pm 10\%$.

Результаты и их обсуждение

Сечения процессов одноэлектронного захвата $\sigma_{01}^{21}(\text{CO}^+)$, диссоциативного одноэлектронного захвата $\sigma_{01}^{21}(\text{C}^+ + \text{O})$ и $\sigma_{01}^{21}(\text{C} + \text{O}^+)$ и полное сечение захвата одного электрона σ^{21} , представляющее собой сумму сечений всех элементарных процессов, в которых

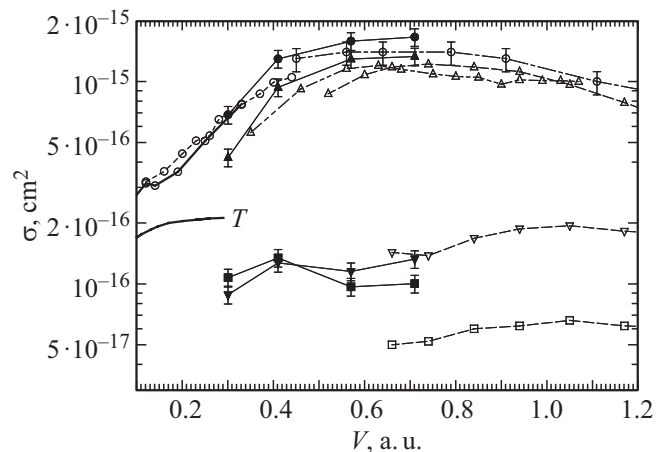


Рис. 2. Сечения процессов одноэлектронного захвата и диссоциативного одноэлектронного захвата при столкновении $\text{He}^{2+} + \text{CO}$. \bullet — σ^{21} , \blacktriangle — $\sigma_{01}^{21}(\text{CO}^+)$, \blacktriangledown — $\sigma_{01}^{21}(\text{C}^+ + \text{O})$, \blacksquare — $\sigma_{01}^{21}(\text{C} + \text{O}^+)$ настоящая работа; $\text{---}\triangle\text{---}$ — $\sigma_{01}^{21}(\text{CO}^+)$, $\text{---}\nabla\text{---}$ — $\sigma_{01}^{21}(\text{C}^+ + \text{O})$, $\text{---}\square\text{---}$ — $\sigma_{01}^{21}(\text{C} + \text{O}^+)$ [4]; $\text{---}\triangle\text{---}$ — $\sigma_{01}^{21}(\text{CO}^+)$ [16]; $\text{---}\circ\text{---}$ — σ^{21} [2], $\text{---}\circ\text{---}$ — σ^{21} [14]; $\text{---}\circ\text{---}$ и $\text{---}T\text{---}$ — σ^{21} (эксперимент и расчет соответственно) [15].

налетающий ион захватывает один электрон у молекулы мишени, приведены на рис. 2. Измеренное в настоящей работе сечение σ^{21} хорошо согласуется с данными других авторов [2,14,15], что позволяет сделать вывод о корректности примененной в работе процедуры определения абсолютных величин сечений.

В работе [16] было проведено масс-спектрометрическое исследование состава ионов отдачи, образующихся при взаимодействии ионов He^{2+} с молекулами CO . В связи с тем, что авторы работы не фиксировали зарядовое состояние налетающего иона после столкновения, приведенные в работе сечения определяются суммой процессов ионизации, захвата одного и двух электронов, причем сечение последнего σ^{20} сравнимо с сечением σ^{21} [2,14,15]. Однако образование молекулярного иона CO^+ возможно в процессах одноэлектронного захвата (1) и однократной ионизации, сечение которой в исследуемом диапазоне скоростей должно быть невелико, что и подтверждается хорошим согласием сечения образования иона CO^+ , полученного в работе [4], с сечением $\sigma_{01}^{21}(\text{CO}^+)$, измеренным в настоящей работе (рис. 2). Рассчитанное методом сильной связи в квазимолекулярном приближении в работе [15] сечение процесса захвата одного электрона существенно меньше экспериментально измеренных как σ^{21} , так и $\sigma_{01}^{21}(\text{CO}^+)$.

При взаимодействии ионов C^{2+} с молекулами CO роль процесса диссоциативного захвата существенно возрастает (рис. 3). При этом сечение процесса (2а) оказывается существенно больше, чем сечение процесса (2б), что характерно для этого процесса при захвате одного электрона протонами [3,4] и для процесса ионизации молекулы CO электронным ударом [6,7]. Расчеты сечения процесса (1), выполненные в работах [17,18], заметно расходятся между собой, но при этом могут считаться разумной оценкой величины сечения одноэлектронного захвата (рис. 3).

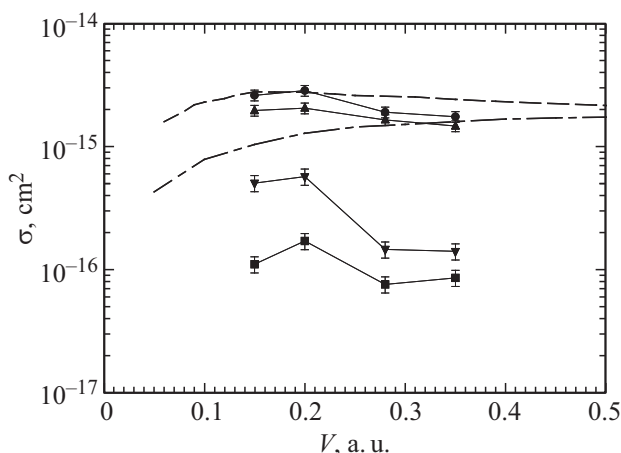


Рис. 3. Сечения процессов одноэлектронного захвата и диссоциативного одноэлектронного захвата при столкновении $\text{C}^{2+} + \text{CO}$. ● — σ^{21} , ▲ — $\sigma_{01}^{21}(\text{CO}^+)$, ▼ — $\sigma_{01}^{21}(\text{C}^+ + \text{O})$, ■ — $\sigma_{01}^{21}(\text{C} + \text{O}^+)$ настоящая работа; - - - [17]; — — — [18].

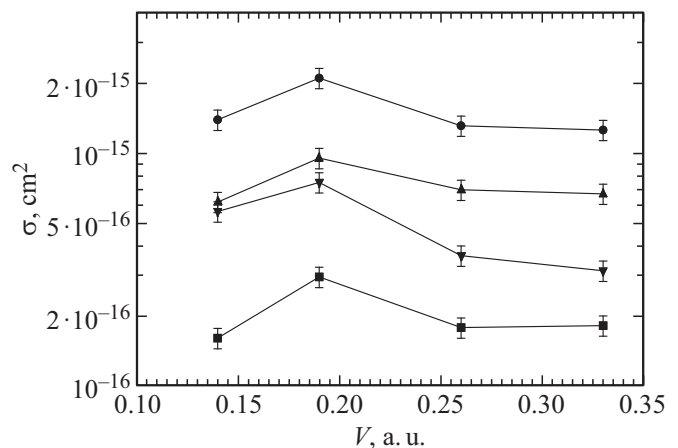


Рис. 4. Сечения процессов одноэлектронного захвата и диссоциативного одноэлектронного захвата при столкновении $\text{N}^{2+} + \text{CO}$. ● — σ^{21} , ▲ — $\sigma_{01}^{21}(\text{CO}^+)$, ▼ — $\sigma_{01}^{21}(\text{C}^+ + \text{O})$, ■ — $\sigma_{01}^{21}(\text{C} + \text{O}^+)$ настоящая работа.

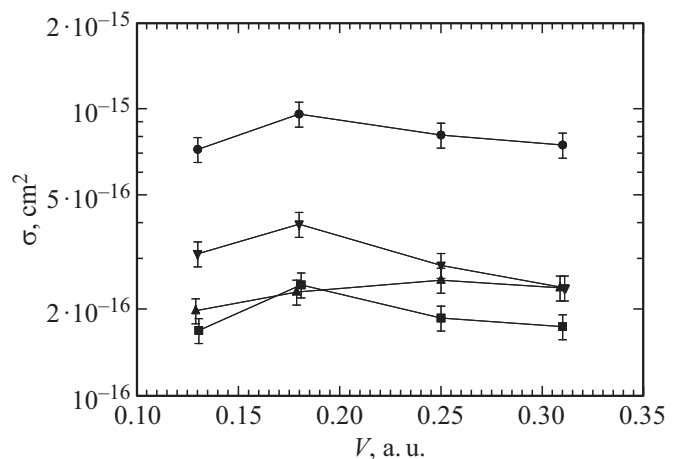


Рис. 5. Сечения процессов одноэлектронного захвата и диссоциативного одноэлектронного захвата при столкновении $\text{O}^{2+} + \text{CO}$. ● — σ^{21} , ▲ — $\sigma_{01}^{21}(\text{CO}^+)$, ▼ — $\sigma_{01}^{21}(\text{C}^+ + \text{O})$, ■ — $\sigma_{01}^{21}(\text{C} + \text{O}^+)$ настоящая работа.

При взаимодействии ионов N^{2+} с молекулами CO процесс (1) также является основным по величине сечения, но при малых скоростях столкновений процесс (2а) имеет сечение, сравнимое по величине с сечением процесса (1) (рис. 4). При взаимодействии ионов O^{2+} с молекулами CO сечение процесса диссоциативного захвата (сумма сечений (2а) и (2б)) больше сечения процесса (1) во всем исследованном диапазоне скоростей столкновений (рис. 5), а основным по величине сечения является процесс (2а).

Дефект энергии экзотермического процесса захвата одного электрона является основным параметром многоуровневой модели Ландау–Зинера [19], в рамках которой обычно рассматривается процесс захвата электрона при взаимодействии многозарядных ионов с атомами, и

Процессы, происходящие при захвате одного электрона у молекулы CO и соответствующие энергии появления (AE)

Обозначение процесса на рис. 6	Продукты реакции	AE (eV)
	$C(^3P)+O(^3P)$	11.11 ^a
X	$CO^+(X^2\Sigma^+)$	14.0 ^b
A	$CO^+(A^2\Pi)$	16.5 ^b
B	$CO^+(B^2\Sigma^+)$	19.7 ^b
C	$CO^+(C^2\Delta)$	21.8 ^b
D	$CO^+(D^2\Pi)$	22.0 ^b
1	$C^+(^2P)+O(^3P)$	22.4 ^c
2	$C^+(^2P)+O(^1D)$	24.3 ^c
3	$O^+(^4S)+C(^3P)$	24.7 ^c
4	$C^+(^2P)+O(^1S)$	26.6 ^c
5	$C^+(^4P)+O(^3P)$	27.7 ^c
6	$O^+(^2D)+C(^3P)$	28.1 ^c

Примечание. ^a — энергия диссоциации молекулы CO ($X^1\Sigma^+$) [12], ^b — энергия молекулярных состояний с $v = 0$ [22], ^c — оценка асимптотической энергии на основании данных об энергии диссоциации [12] и данных об энергии атомных состояний [24].

определяется выражением (3):

$$Q = E(CO(X)) - E(A^+(2s+1L)) - E_{ex}(CO^+(2s+1\Lambda)), \quad (3)$$

где $E(CO(X))$ — электронная энергия молекулы до столкновения, $E(A^+(2s+1L))$ — электронная энергия иона, захватившего электрон, $E_{ex}(CO^+(2s+1\Lambda))$ — энергия возбуждения образовавшегося молекулярного иона. Процесс экзотермический, если величина $Q > 0$.

Для вычисления Q надо знать энергии возможных конечных электронных состояний молекулярного иона $CO^+(2s+1\Lambda)$, которые были определены в работах [20–22] и измерены экспериментально, например [23]. Асимптотические значения энергий различных каналов диссоциации иона CO^+ могут быть вычислены на основании данных об энергии атомарных уровней [24] и энергии диссоциации молекулы CO [12], результаты такой оценки хорошо согласуются с экспериментальными [23] и теоретическими данными [21,22]. Молекулярные продукты, образующиеся в процессе захвата одного электрона, и их энергии появления, используемые в настоящей работе для оценки величины Q , приведены в таблице.

Процесс захвата электрона многозарядными ионами у атомов эффективно происходит вследствие ландау–зинеровских переходов в области псевдопересечений термов образующейся квазимолекулы. При рассматриваемых скоростях столкновений процесс имеет большое сечение, если $R_c \approx 3–9$ а.е. [25], где R_c — оценка расстояния сближения сталкивающихся частиц, при котором и происходит электронный переход. Это так называемое „окно реакций“ для налетающих двухзарядных ионов соответствует дефекту энергии экзотермического процесса $Q \approx 3–9$ eV.

При взаимодействии иона He^{2+} с молекулой CO канал процесса захвата электрона в основное состояние иона He^+ ($n = 1$) имеет большой дефект энергии $Q \sim 40–30$ eV, что делает этот канал процесса маловероятным и, скорее всего, при его осуществлении происходит диссоциация образующегося молекулярного иона CO^+ . Каналы процесса захвата электрона в возбужденное состояние иона He^+ ($n = 2$) оказываются эндотермическими, причем минимальный дефект энергии $Q = -0.54$ eV имеет канал процесса захвата с образованием недиссоциированного молекулярного иона

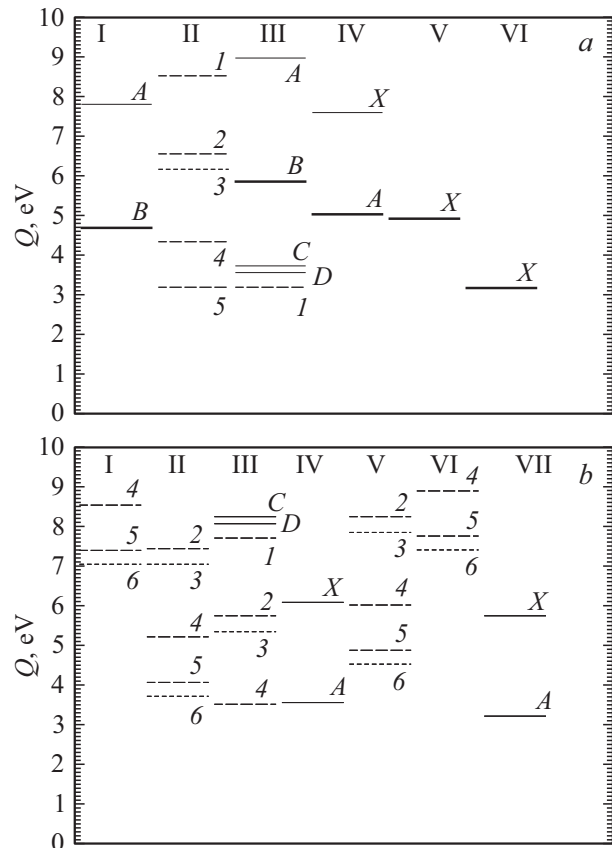


Рис. 6. Дефект энергии процесса захвата одного электрона ионами C^{2+} и O^{2+} . Индексы у уровней дефектов энергий соответствуют обозначению процессов, приведенных в таблице. *a* — $C^{2+}+CO$ ($X^1\Sigma^+$). Римскими цифрами обозначены каналы процесса захвата, соответствующие следующим начальным и конечным электронным состояниям налетающего иона: I — $C^{2+}(2s^2\ ^1S) \rightarrow C^+(2s^2\ 2p\ ^2P)$, II — $C^{2+}(2s2p\ ^3P) \rightarrow C^+(2s^22p\ ^2P)$, III — $C^{2+}(2s2p\ ^3P) \rightarrow C^+(2s2p^2\ ^4P)$, IV — $C^{2+}(2s2p\ ^3P) \rightarrow C^+(2s2p\ ^2D)$, V — $C^{2+}(2s^2p\ ^3P) \rightarrow C^+(2s2p^2\ ^2S)$, VI — $C^{2+}(2s2p^2\ ^2P) \rightarrow C^+(2s2p^2\ ^2P)$. — — процессы с образованием ионов CO^+ (жирными линиями отмечены дефекты энергий процессов, наблюдавшихся в работе [26]), - - - - - процессы с образованием $C^+ + O$, — процессы с образованием $C + O^+$. *b* — $O^{2+}+CO$ ($X^1\Sigma^+$). I — $O^{2+}(2p^2\ ^3P) \rightarrow O^+(2s^22p^3\ ^4S)$, II — $O^{2+}(2p^2\ ^3P) \rightarrow O^+(2s^2\ 2p^3\ ^2D)$, III — $O^{2+}(2p^2\ ^3P) \rightarrow O^+(2s^22p^3\ ^2P)$, IV — $O^{2+}(2p^2\ ^3P) \rightarrow O^+(2s2p^4\ ^2P)$, V — $O^{2+}(2p^2\ ^1D) \rightarrow O^+(2s^22p^3\ ^2D)$, VI — $O^{2+}(2p^2\ ^1S) \rightarrow O^+(2s^22p^3\ ^2D)$, VII — $O^{2+}(2p^2\ ^1S) \rightarrow O^+(2s2p^4\ ^4P)$.

CO^+ ($X^2\Sigma^+$, $v = 0$) в низшем колебательном состоянии, что и объясняет большое сечение захвата одного электрона с образованием недиссоциированного молекулярного иона (процесс (1)).

При анализе величин дефектов энергии процессов с участием двухзарядных ионов C^{2+} , N^{2+} и O^{2+} надо учитывать, во-первых, что в ионном пучке не полностью ободранные ионы могут находиться как в основном, так и в метастабильных состояниях [26–29]. Во-вторых, процесс одноэлектронного захвата может сопровождаться изменением электронного состояния остова иона, захватившего электрон, т.е. осуществляться как многоэлектронный процесс, даже если не происходит возбуждения образующегося молекулярного иона.

На рис. 6, *a* приведены дефекты энергии для наиболее вероятных каналов процесса захвата одного электрона ионами C^{2+} . Как видно из приведенных данных, при взаимодействии иона C^{2+} ($2s^2\ ^1S$) (канал I на рис. 6, *a*) с молекулой CO в „окно реакции“ попадают лишь каналы, ведущие к образованию ионов в состоянии C^+ ($2s^22p\ ^2P$) и недиссоциированных ионов CO^+ ($A^2\Pi$) и CO^+ ($B^2\Sigma^+$). Остальные пять рассматриваемых каналов процесса захвата электрона (отмечены на рис. 6, *a* римскими цифрами II–VI), осуществляются при взаимодействии метастабильного иона C^{2+} ($2s2p\ ^3P$) с молекулой. Канал процесса захвата II с образованием иона C^+ ($2s^22p\ ^2P$) в основном состоянии, должен, как видно из рис. 6, *a*, сопровождаться диссоциацией образующегося молекулярного иона CO^+ . Результаты проведенного качественного анализа подтверждаются исследованием заселенности электронных состояний партнеров процесса захвата одного электрона при столкновении ионов C^{2+} с энергией $E_p \approx 1\text{ keV}$ с молекулами CO, выполненным методом столкновительной спектроскопии [26]. Дефекты энергии каналов процесса захвата, выделенные жирными линиями на рис. 6, *a*, наблюдаются в настоящей работе, что подтверждает обоснованность используемого метода качественного анализа.

При анализе взаимодействия ионов O^{2+} с молекулами CO учитывалось, что ионы-снаряды могли находиться в трех электронных состояниях O^{2+} ($2s^22p^2\ ^3P$) (GS), O^{2+} ($2s^22p^2\ ^1D$) ($MS\ \Delta E = 2.51\text{ eV}$) и O^{2+} ($2s^22p^2\ ^1S$) ($MS\ \Delta E = 5.35\text{ eV}$) [24]. Как видно из приведенных на рис. 6, *b* дефектах энергии каналов процесса захвата, при захвате одного электрона ионами O^{2+} в „окно реакции“ попадают каналы процессов, в основном приводящие к диссоциации образующегося молекулярного иона CO^+ . Молекулярные ионы CO^+ ($C^2\Delta$) и CO^+ ($D^2\Pi$), которые в рамках рассматриваемой модели, вероятно, образуются при реализации канала процесса захвата III, имеют небольшую глубину потенциальной ямы [22] и, скорее всего, диссоциируют. Каналы процесса захвата, обозначенные на рис. 6, *b* IV и VII должны приводить к образованию стабильных молекулярных ионов, но эти процессы обусловлены возбуждением остова молекулярного иона O^+ , что должно приводить к уменьшению сечения этих процессов по сравнению с одноэлектронными.

Заключение

Таким образом, структура электронных уровней иона O^+ , образующегося в процессе захвата, и определяет доминирующую роль процесса диссоциативного захвата одного электрона. Качественный анализ, основанный на рассмотрении дефекта энергии процесса, показывает, что для однозарядных налетающих ионов этот эффект должен наблюдаться для ионов He^+ [30] и для Ne^+ , для которых это и показано экспериментально [8]. Кроме того, для указанных выше ионов следует ожидать доминирующей роли процесса диссоциативного захвата при взаимодействии с молекулами N_2 и O_2 . Ясно, что для многозарядных ионов A^{z+} с $z \geq 5$ из-за большого количества конечных электронных состояний, образующегося в процессе захвата иона $A^{(z-1)+}$, процесс (1) будет доминировать над процессом (2), что и наблюдалось нами при исследовании взаимодействия ионов Ar^{z+} ($z = 5, 6$) с молекулами CO.

Финансирование работы

Работа выполнена по Гос. заданию тема № 0040-2019-0023.

Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Список литературы

- [1] *Rudd M.E., Goffe T.V., Itoh A., Du Bois R.D.* // Phys. Rev. A. 1985. Vol. 32. P. 829–835.
- [2] *Rudd M.E., Goffe T.V., Itoh A.* // Phys. Rev. A. 1985. Vol. 32. P. 2128–2133.
- [3] *Афросимов В.В., Лейко Г.А., Мамаев Ю.А., Панов М.Н., Вуйович М.* // ЖЭТФ. 1973. Т. 65. Вып. 2. (8). С. 495–504.
- [4] *Shah M.B., Gilbody H.B.* // J. Phys. B: At. Mol. Opt. Phys. 1990. Vol. 23. P. 1491–1499.
- [5] *Latimer C.J.* // J. Phys. B: Atom. Molec. Phys. 1977. Vol. 10. P. 515–522.
- [6] *Orient O.J., Srivastava S.K.* // J. Phys. B: At. Mol. Phys. 1987. Vol. 20. P. 3923–3936.
- [7] *Tian C., Vidal C.R.* // Phys. Rev. A. 1999. Vol. 59. P. 1955–1965.
- [8] *Graham W.G., Latimer C.J., Browning R., Gilbody H.B.* // J. Phys. B: At. Mol. Phys. 1973. Vol. 6. P. 2641–2652.
- [9] *Lindsay B.G., Yu W.S., Stebbings R.F.* // Phys. Rev. A. 2005. Vol. 71. P. 032705.
- [10] *Афросимов В.В., Басалаев А.А., Огурцов Г.Н., Панов М.Н.* // ЖТФ. 2014. Т. 84. Вып. 5. С. 14–20.
- [11] *Афросимов В.В., Басалаев А.А., Панов М.Н.* // Письма в ЖТФ. 2017. Т. 43. Вып. 2. С. 76–83.
- [12] *Гурвич Л.В., Карачевцев Г.В., Кондратьев В.Н., Лебедев Ю.А., Медведев В.А., Потанов В.К., Ходеев Ю.С.* Энергия разрыва химических связей. Потенциалы ионизации и сродство к электрону. М.: Наука, 1974. 351 с.
- [13] *Афросимов В.В., Басалаев А.А., Морозов Ю.Г., Панов М.Н., Смирнов О.В., Тропн Э.А.* // ЖТФ. 2011. Т. 81. Вып. 5. С. 9–15.

- [14] Čadež I., Greenwood J.B., Chutjian A., Mawhorter R.J., Smith S.J., Niimura M. // J. Phys. B: At. Mol. Opt. Phys. 2002. Vol. 35. P. 2515–2524.
- [15] Kusakabe T., Miyamoto Y., Tawara H. // Phys. Rev. A. 2006. Vol. 73. P. 022706.
- [16] Graham W.G., Latimer C.J., Browning R., Gilbody H.B. // J. Phys. B: At. Mol. Phys. 1974. Vol. 7. P. L405–L408.
- [17] Bene E., Martínez P., Halsáz G.J., Vibók Á., Bacchus-Montabonel M.C. // Phys. Rev. A. 2009. Vol. 80. P. 012711.
- [18] Gabás P.M.M., Errea L.F., Méndez L., Rabadán I. // Phys. Rev. A. 2012. Vol. 85. P. 012702.
- [19] Salop A., Olson R.E. // Phys. Rev. A. 1976. Vol. 13. P. 1312–1320.
- [20] Krupenie P.H., Weissman S. // J. Chem. Phys. 1965. Vol. 43. P. 1529–1534.
- [21] Krishnamurthi V., Nagesha K., Marathe V.R., Mathur A. // Phys. Rev. A. 1991. Vol. 44. P. 5460–5467.
- [22] Okada K., Iwata S. // J. Chem. Phys. 2000. Vol. 112. P. 1804–1808.
- [23] Hierl P.M., Franklin J.L. // J. Chem. Phys. 1967. Vol. 47. P. 3154–3161.
- [24] Kramida A., Ralchenko Yu., Reader J. NIST ASD Team (2015). NIST Atomic Spectra Database (ver. 5.3), [Online]. Available: <http://physics.nist.gov/asd>
- [25] Janev R.K., Presnyakov L.P. // Phys. Rep. 1981. Vol. 70. N 1.
- [26] Lepusch P., Dumitriu D., Aumayr F., Winter H.P. // J. Phys. B: At. Mol. Opt. Phys. 1997. Vol. 30. P. 5009–5024.
- [27] Jellen-Wutte U., Schweinzer J., Vanek W., Winter H. // J. Phys. B: At. Mol. Phys. 1985. Vol. 18. P. L779–L785.
- [28] Kamber E.Y., Brenton A.G., Beynon J.H. // J. Phys. B: At. Mol. Phys. 1984. Vol. 17. P. 4919–4933.
- [29] Афросимов В.В., Басалаев А.А., Панов М.Н. // ЖТФ. 2005. Т. 75. Вып.8. С. 26–31. [Afrosimov V.V., Basalaev A.A., Panov M.N. // Tech. Phys. 2005. Vol. 50. N 8. P. 987.]
- [30] Werbowy S., Pranszke B. // Phys. Rev. A. 2016. Vol. 93. P. 022713.