

02

## Сечение автоионизации атома калия при возбуждении электронным ударом

© А.А. Боровик

Институт электронной физики НАН Украины,  
88017 Ужгород, Украина  
e-mail: sasha@aborovik.uzhgorod.ua

(Поступило в Редакцию 26 июля 2011 г. В окончательной редакции 21 ноября 2011 г.)

Измерено сечение автоионизации атома калия при возбуждении электронами в диапазоне энергий от первого автоионизационного порога при 18.72 eV до 202 eV. Данные получены путем определения полной интенсивности электронных спектров, образующихся при распаде автоионизационных состояний  $3p^5n_1l_1n_2l_2$ . Поведение сечения характеризуется наличием двух максимумов при 21 и 32 eV, где оно составляет  $1.8 \cdot 10^{-16}$  и  $2.2 \cdot 10^{-16}$  cm<sup>2</sup> соответственно. Из анализа динамики возбуждения автоионизационных состояний следует, что первый максимум сечения обусловлен резонансным характером их припорогового возбуждения. Второй максимум, а также поведение сечения в области энергий выше 50 eV отражают динамику электронного возбуждения квартетных и дублетных автоионизационных состояний. Проведен сравнительный анализ полученного сечения автоионизации с известными данными по полному сечению однократной ионизации атома калия электронным ударом. Установлено, что относительный вклад автоионизации в полное сечение однократной ионизации достигает 30% при энергии 32 eV.

### Введение

Известно, что непрямые процессы могут существенно изменять сечение ионизации атомов и молекул и тем самым влиять на зарядный состав и температуру различных плазменных сред [1]. Автоионизация является одним из таких процессов. Уже первые исследования ионизации атомов щелочных металлов электронным ударом обнаружил заметный подъем сечения при энергиях выше порога возбуждения внешней оболочкой  $p^6$  [2]. Как показали эти и другие исследования [3–5], наблюдаемый эффект обусловлен электронным распадом автоионизационных состояний  $np^5n_1l_1n_2l_2$  и является особенно заметным в тяжелых атомах, таких как калий ( $n = 3$ ), рубидий ( $n = 4$ ), цезий ( $n = 5$ ).

Исследования электронных спектров автоионизационных состояний щелочных атомов [6–8] показали, что в диапазоне энергий столкновений от порога возбуждения до нескольких сотен электрон-вольт их интенсивность определяется в основном теми атомными автоионизационными состояниями, которые энергетически расположены ниже первых возбужденных ионных уровней. Такие состояния имеют единственный канал электронного распада, при котором образуются одnorазрядный ион в основном состоянии и быстрый (автоионизационный) электрон. Как было показано [9], в этом случае сечение автоионизации<sup>1</sup> щелочного атома для значения энергии столкновений  $E$  определяется выражением  $\sigma_{\text{aut}} = \sum_i \sigma_{\text{exc}}^i A_{\text{aut}}^i$ , где  $\sigma_{\text{exc}}^i$  — сечение возбуждения автоионизационного состояния  $i$  при энергии столкновений  $E$ ,  $A_{\text{aut}}^i$  — вероятность распада этого состояния в электронном канале. Очевидно, что зависимость  $\sigma_{\text{aut}}$

от  $E$  представляет собой функцию автоионизации атома, которая в свою очередь отражает автоионизационный вклад в энергетическую зависимость полного сечения однократной ионизации.

Впервые экспериментальное исследование сечения автоионизации щелочных атомов было проведено на примере атома калия в узком диапазоне энергий столкновений 18.7–24.4 eV [11]. Эти результаты обнаружили определяющее влияние резонансных процессов возбуждения оболочки  $3p^6$  на величину и энергетическое поведение сечения ионизации. До сих пор оставался открытым вопрос о соотношении сечений автоионизации и однократной ионизации атома калия при энергиях столкновений выше 25 eV.

Настоящая работа является продолжением исследования [11] на диапазон энергий столкновений до 202 eV. В разд. 1 приводится краткое описание экспериментальной установки, методики измерений и обработки данных, а также ошибки измерений. В разд. 2 представлены полученные результаты и дано их всестороннее обсуждение. Разд. 3 содержит обобщение полученных данных.

### 1. Аппаратура и методика измерений

В настоящей работе использовались экспериментальная установка и методика исследований, которые ранее были подробно описаны в работах [11,12]. Поэтому здесь рассмотрим только основные особенности проведенных измерений. В состав электронного спектрометра входил источник первичного электронного пучка, анализатор энергий электронов и источник пучка нейтральных атомов. Для энергетического анализа рассеянных и автоионизационных электронов применялся 127°-ный электростатический дефлектор с энергетическим и угловым разрешениями 0.15 eV и 3° соответственно. Энергетическое

<sup>1</sup> В литературе (см., например, [10]) используется также термин „сечение возбуждения-автоионизации“.

разрешение анализатора оценивалось путем измерения ширины линии, соответствующей электронному распаду уровня  $(3p^5 4s^2)^2 P_{3/2}$  с известной автоионизационной шириной  $\Gamma = 5.9 \text{ meV}$  [13].

В качестве источника первичных электронов использовалась пятиэлектродная пушка с длиннофокусной трехлинзовой системой [14], которая обеспечивала наряду с хорошей коллимацией электронного пучка его моноэнергетичность не хуже  $0.7 \text{ eV}$ . Оценка степени моноэнергетичности проводилась по ширине пика упругого рассеяния в спектрах потерь энергии электронов. Отметим, что данная ширина включает в себя также и ширину аппаратной функции анализатора рассеянных электронов, которая при выбранном в настоящей работе режиме не превышала  $0.1 \text{ eV}$ . Таким образом, измеряемая в спектрах потерь ширина упругого пика служила верхним пределом для оценки искомой моноэнергетичности электронного пучка.

Измерения проведены при экспериментальных условиях, в целом близких к тем, что были описаны ранее в [11]. Калибровка энергетической шкалы в автоионизационных спектрах осуществлялась по известному значению энергии возбуждения наиболее низколежащего автоионизационного состояния  $(3p^5 4s^2)^2 P_{3/2}$  при  $18.722 \text{ eV}$  [15]. Для калибровки шкалы энергий первичных электронов автоионизационный спектр и спектр потерь энергии рассеянных электронов в области возбуждения уровней  $3p^6 nl$  измерялись одновременно для одного значения энергии первичного электронного пучка. Последнее выбиралось таким, чтобы оба спектра одновременно попадали в сканируемый диапазон энергий. В этом случае истинная энергия первичных электронов  $E$  определялась из соотношения  $E = E_{\text{aut}} + E_{\text{loss}} + e\Delta V$ , где  $E_{\text{aut}}$  и  $E_{\text{loss}}$  определяют известные значения энергий возбуждения автоионизационного уровня  $(3p^5 4s^2)^2 P_{3/2}$  ( $18.722 \text{ eV}$ , см. выше) и одного из уровней  $3p^6 nl$  [16], а  $\Delta V$  является „расстоянием“ (в вольтах) между положением в спектре линий, соответствующих данным уровням. Погрешности шкал энергий первичных и автоионизационных электронов составляли в настоящей работе  $\pm 0.06$  и  $\pm 0.04 \text{ eV}$  соответственно.

Автоионизационные электронные спектры атомов калия измерялись последовательно с изменением энергий столкновений  $E$  от минимального порога возбуждения оболочки  $3p^6$ , равного  $18.72 \text{ eV}$ , до  $202 \text{ eV}$ . Минимальный шаг изменения  $E$  составлял  $0.1 \text{ eV}$  в области энергий ниже  $30 \text{ eV}$ . Для минимизации влияния анизотропии углового распределения автоионизационных электронов измерения проведены под „магическим“ углом наблюдения  $54.7^\circ$  [17]. Для контроля стабильности экспериментальных условий (плотности атомного пучка, пропускания анализатора, эффективности системы регистрации сигнала) применялась ранее разработанная методика [18], которая хорошо зарекомендовала себя при исследовании функций возбуждения автоионизационных состояний атомов щелочных металлов (см., например,

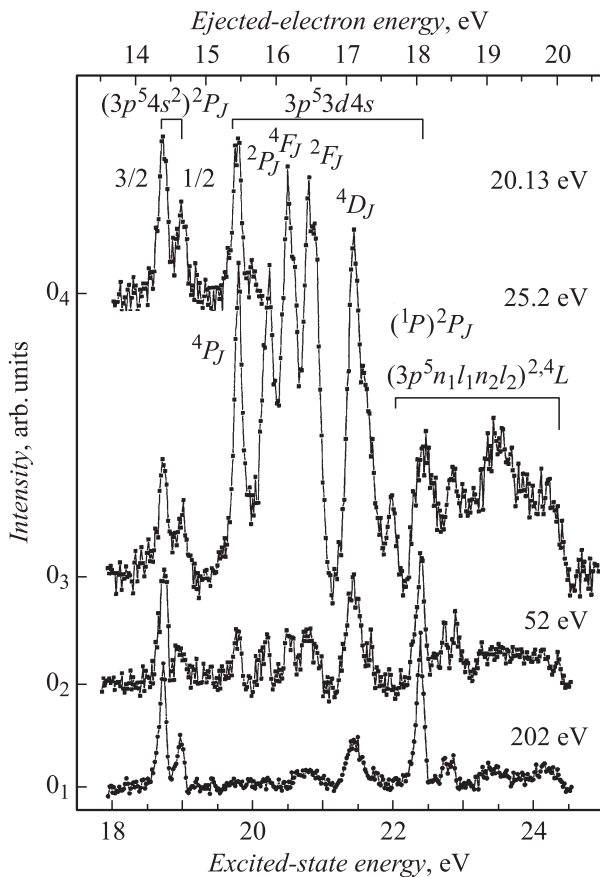
работу [19] и ссылки к ней). В соответствии с этой методикой после измерения группы основных автоионизационных спектров (как правило, 3–5 спектров) измерялся „тестовый“ спектр для фиксированного значения энергии столкновений. Поведение интенсивности такого спектра в течение всего периода измерений позволяло в случае каких-либо отклонений определить автоионизационные спектры. В данных исследованиях этого коэффициент, однако, не превышал 1–1.5%.

Относительное сечение автоионизации атома калия получено в виде приведенной к единице тока первичного электронного пучка суммарной интенсивности линий, наблюдаемых в измеренных спектрах. При этом представленные в настоящей работе результаты получены путем сравнения и усреднения данных трех независимых измерений. Экспериментальное относительное сечение „сшивалось“ по нескольким точкам с абсолютным сечением автоионизации в припороговой области энергий столкновений  $18.7\text{--}24.4 \text{ eV}$  [11]. С учетом ошибки измерений [11] (15%), статистической погрешности и флуктуаций экспериментальных условий в данных измерениях полная относительная ошибка в определении абсолютного сечения автоионизации не превышала 20%.

## 2. Результаты измерений и их обсуждение

На рис. 1 представлены примеры автоионизационных спектров атома калия, измеренные для значений энергии столкновений  $E = 20.13, 25.2, 52$  и  $202 \text{ eV}$ . Анализ динамики возбуждения спектров показывает, что наблюдаемые линии соответствуют распаду атомных автоионизационных состояний  $3p^5 n_1 l_1 n_2 l_2$ , расположенных в относительно узком интервале энергий возбуждения  $18.7\text{--}24.5 \text{ eV}$ ; полная картина спектров наблюдается уже при энергии столкновений  $25.2 \text{ eV}$ . Поскольку первый возбужденный уровень иона  $\text{K}^+$  расположен при энергии  $24.44 \text{ eV}$  [16], то указанные состояния имеют единственный канал распада с образованием  $\text{K}^+$  в основном состоянии  $(3p^6)^1 S_0$ . Как видно, также при энергии столкновений  $E = 25\text{--}52 \text{ eV}$  полная интенсивность спектров в основном определяется совокупность линий, которые отражают распад автоионизационных состояний с порогами возбуждения в интервале  $19\text{--}22 \text{ eV}$ . При больших значениях  $E$  основной вклад вносят доминирующие по интенсивности группы линий  $^2 P, ^4 P, ^4 D, (^1 P)^2 P$ . Естественно предположить, что наблюдаемая динамика возбуждения автоионизационных спектров будет в значительной мере определять и энергетическое поведение сечения автоионизации атома калия.

На рис. 2, а представлено измеренное в настоящей работе сечение автоионизации атома калия в диапазоне энергий столкновений от первого автоионизационного порога при  $18.72$  до  $202 \text{ eV}$ . Как видно, поведение сечений действительно носит сложный характер, отражающий вклад в его формирование различных по типу возбуждения групп автоионизационных уровней. Для

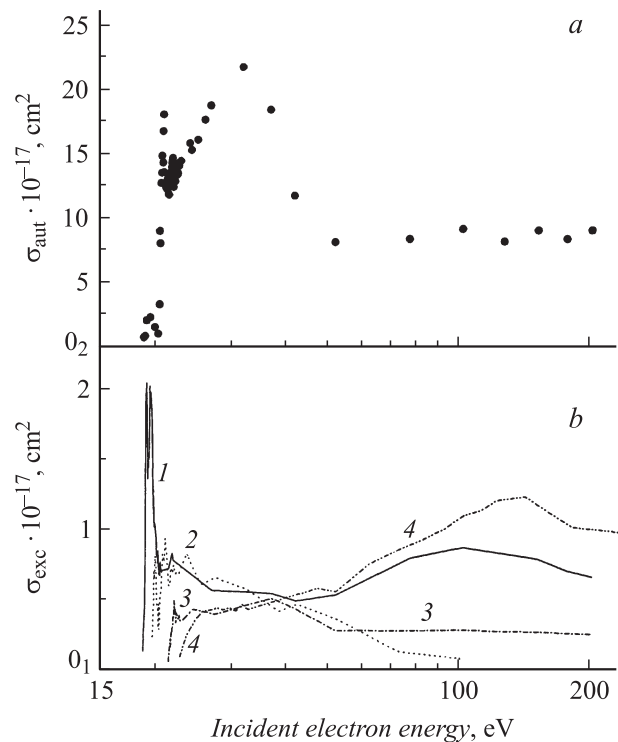


**Рис. 1.** Автоионизационные электронные спектры атома калия, измеренные при значениях энергии столкновений  $E = 20.13, 25.2, 52$  и  $202$  eV.

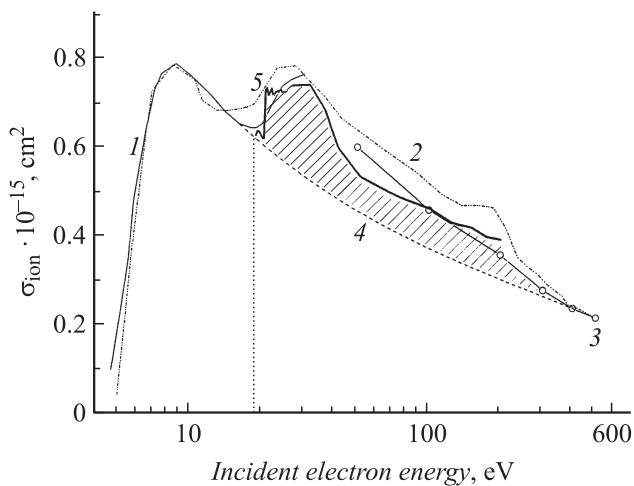
анализа этого вклада, на рис. 2, *b* в том же диапазоне энергий представлены полученные авторами ранее сечения возбуждения наиболее эффективно возбуждающихся дублетных и квартетных автоионизационных состояний атома калия [12,19]. Сравнение этих данных показывает, что первый максимум сечения автоионизации связан исключительно с резонансным характером припорогового возбуждения низколежащих автоионизационных состояний. Второй, более интенсивный максимум обусловлен как обменным характером возбуждения всей совокупности квартетных автоионизационных состояний, распад которых наблюдается в измеренных спектрах (см., например, спектр при энергии 25.2 eV на рис. 1), так и резонансным возбуждением высоколежащих дублетных автоионизационных состояний. Поведение сечения автоионизации в области энергий выше 50 eV определяется суммой возрастающего сечения электронного возбуждения дублетных состояний и снижающегося сечения возбуждения квартетных состояний. Отметим здесь, что в результате конфигурационного смешивания с дублетами [19,20] некоторые квартетные состояния могут достаточно эффективно возбуждаться и при больших энергиях столкновений. Таким примером является состояние  $^4D$  (см. кривую 3 на рис. 2). Этот эффект, а также незначительное в целом число

эффективно возбуждающихся дублетных состояний (см. спектр при 202 eV на рис. 1) обуславливают медленный спад сечения автоионизации выше 100 eV.

Представляет интерес сравнить полученное сечение автоионизации  $\sigma_{\text{aut}}$  с полным сечением однократной ионизации атома калия электронным ударом. Из известных в литературе экспериментальных работ по абсолютным сечениям ионизации калия были взяты данные [3,4], которые включены в базу данных по атомным константам [21] и широко используются другими авторами. Недостатком этих данных, однако, является ограниченность диапазона исследованных энергий — от порога ионизации до 30 eV в [4] и от 50 до 500 eV в [3]. Из относительных экспериментальных данных [2,22], которые перекрывают широкий диапазон энергий от порога до 500 eV, были выбраны данные [2] как наиболее близкие к результатам [4,5] по характеру энергетической зависимости сечения в припороговой области. Для возможности визуального сравнения с абсолютными сечениями эти данные были нормированы на сечение [4] при 9 eV (см. первый максимум на рис. 3). Для оценки величины относительного вклада автоионизации в полное сечение однократной ионизации атома калия электронным ударом измеренное сечение автоионизации  $\sigma_{\text{aut}}$  было просуммировано с сечением однократной ионизации без вклада автоионизации. Последнее было получено путем интерполяции данных [4] на участке 10–16 eV и данных [3] в точках 400 и 500 eV. Результирующее



**Рис. 2.** *a* — сечение автоионизации  $\sigma_{\text{aut}}$  атома калия (настоящая работа); *b* — сечение электронного возбуждения  $\sigma_{\text{exc}}$  атомных автоионизационных состояний  $(3p^5 4s^2)^2P$  (1),  $(3p^3 3d 4s)^4P$  (2),  $(3p^3 3d 4s)^4D$  (3),  $3p^5 3d(1P)4s^2P$  (4) атома калия [12,19].



**Рис. 3.** Полное сечение однократной ионизации атома калия электронным ударом: 1 — [4]; 2 — [2]; 3 — [3]; 4 — сечение однократной ионизации без учета автоионизационного вклада (см. текст); 5 — полное сечение однократной ионизации, полученное в результате суммирования данных 4 и сечения автоионизации  $\sigma_{\text{aut}}$ . Вертикальной штриховой линией обозначен порог возбуждения оболочки  $3p^6$  при 18.72 eV.

сечение однократной ионизации представлено на рис. 3 в виде зависимости 5, а автоионизационный вклад обозначен заштрихованной площадью. Как видно, в области энергий до 36 eV, где возбуждение оболочки  $3p^6$  является доминирующим процессом, все представленные сечения в пределах ошибок измерений (10% [2,3] и 15% [4]) неплохо согласуются как по форме, так и по абсолютной величине. Относительный вклад процесса возбуждения-автоионизации оболочки  $3p^6$  в полное сечение однократной ионизации атома калия достигает 30% при энергии столкновений около 32 eV.

При энергиях выше 36 eV сечение ионизации 5 уступает по величине результатам [2,3]. Это связано с тем, что в данной области энергий начинает проявляться вклад как высоколежащих автоионизационных состояний конфигураций  $3p^5n_1l_1n_2l_2$ , так и тех, которые связаны с возбуждением более глубокой оболочки  $3s^2$ . Учет этих процессов не входил в задачу данных исследований, поскольку требует постановки специальных экспериментов.

## Заключение

Представленные результаты дают достаточно полную картину динамики процесса автоионизации атомов калия при возбуждении электронным ударом и позволяют сделать некоторые обобщающие выводы. Во-первых, величина и энергетическое поведение сечения автоионизации атома калия в диапазоне энергий столкновений 18.78–202 eV в основном определяются сечением и динамикой электронного возбуждения автоионизационных состояний  $(3p^5n_1l_1n_2l_2)^{2,4}L$ , расположенных ниже первых возбужденных уровней иона  $K^+$ . При этом в

припороговой области энергий ( $E < 20$  eV) основную роль в формировании автоионизационного сечения играют резонансные процессы возбуждения как дублетных, так и квартетных состояний. В области энергий ниже 40 eV, где расположен основной максимум сечения, доминируют квартетные состояния, а в области больших энергий — дублетные автоионизационные состояния.

Во-вторых, отсутствие явных минимумов в сечении автоионизации является прямым свидетельством незначительной роли как радиационного канала распада для низколежащих состояний  $(3p^5n_1l_1n_2l_2)^{2,4}L$ , так и радиационных каскадных переходов в системе высоколежащих автоионизационных уровней атома калия.

Работа выполнена при частичной финансовой поддержке международного гранта INTAS № 03-51-4706.

## Список литературы

- [1] *Electron Impact Ionization* / Ed. by T.D. Märk, G.H. Dunn. Springer-Verlag, N. Y. 1985. 379 p.
- [2] Tate J.T., Smith P.T. // Phys. Rev. 1934. Vol. 46. P. 773–776.
- [3] McFarland R.H., Kinney J.D. // Phys. Rev. A. 1965. Vol. 137. P. 1058–1061.
- [4] Zapesochy I.P., Aleksakhin I.S. // Sov. Phys.-JETP. 1969. Vol. 28. P. 41–45.
- [5] Nygaard K.J. // Phys. Lett. A. 1975. Vol. 51. P. 171–172.
- [6] Kavei G., Ottley T., Pejčev V., Ross K.J. // J. Phys. B. 1977. Vol. 10. P. 2923–2933.
- [7] Pejčev V., Rassi D., Ross K.J., Ottley T.W. // J. Phys. B. 1977. Vol. 10. P. 1653–1659.
- [8] Pejčev V., Ross K.J. // J. Phys. B. 1977. Vol. 10. P. 2935–2941.
- [9] Боровик А.А. // Опт. и спектр. 2010. Т. 109. № 3. С. 355–360.
- [10] Mitnik D., Mandelbaum P., Schwob J.L., Bar-Shalom A., Oreg J., Goldstein W.H. // Phys. Rev. A. 1994. Vol. 50. P. 4911–4920.
- [11] Evrij M.J., Borovik A.A., jr., Shimon L.L., Kontros J.E., Borovik A.A. // Nucl. Instrum. Methods. B. 2005. Vol. 233. P. 280–283.
- [12] Borovik A.A., Grum-Grzhimailo A.N., Bartschat K., Zatsarinny O. // J. Phys. B. 2005. Vol. 38. P. 1081–1092.
- [13] Driver R.D. // J. Phys. B: At. Mol. Phys. 1976. Vol. 9. P. 143–145.
- [14] Borovik A.A. // Ukr. Phys. J. 2008. Vol. 53. № 10. P. 1031–1027.
- [15] Mansfield M.W.D. // Proc. R. Soc. Lond. A. 1975. Vol. 346. P. 539–544.
- [16] Moore C.E. Atomic Energy Levels. NBS Circular № 467. 1958. Vol. 1. 154 p.
- [17] Berezhko E.G., Kabachnik N.M. // J. Phys. B. 1977. Vol. 10. P. 2467–2477.
- [18] Borovik A.A., Krasilinec V.N. // J. Phys. B. 1999. Vol. 32. P. 1941–1947.
- [19] Боровик А.А. // Опт. и спектр. 2009. Т. 106. № 2. С. 187–192.
- [20] Kupliauskienė A., Bogdanovich P., Borovik A.A., Zatsarinny O., Grum-Grzhimailo A.N., Bartschat K. // J. Phys. B. 2006. Vol. 39. P. 591–601.
- [21] Tawara H., Kato T. // At. Data Nucl. Data Tables. 1987. Vol. 36. P. 167–353.
- [22] Brink G.O. // Phys. Rev. 1962. Vol. 127. P. 1204–1206.