

УДК 539.184.5

В.І. Роман

Інститут електронної фізики НАН України,
88017, Ужгород, вул. Університетська, 21, Україна
e-mail: viktoriya-roman@mail.ru

ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНА УСТАНОВКА ТА ПЕРШІ РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕННЯ ЗБУДЖЕННЯ АВТОІОНІЗАЦІЙНИХ СТАНІВ АТОМІВ РУБІДІЮ ЕЛЕКТРОННИМ УДАРОМ

Методом електронної спектроскопії з використанням техніки пучків, що перетинаються, вперше одержано функції електронного збудження автоіонізаційних станів атомів рубідію в діапазоні енергій зіткнень від порогу збудження до 600 еВ. Дослідження здійснені під магнічним кутом спостереження 54.7° та з енергетичним розділенням не гірше 0.4 еВ. Проведена спектроскопічна ідентифікація ліній в електронних спектрах. На функціях збудження виявлено резонансну структуру, яка пов'язана з процесом електронного розпаду станів негативних іонів рубідію.

Ключові слова: атом, автоіонізація, збудження, іонізація, електронні спектри, ефективний переріз.

Вступ

Дослідження ефективних перерізів електронного збудження зовнішніх (не валентних) оболонок на предмет утворення та наступного розпаду автоіонізаційних станів дає унікальну інформацію про природу електрон-атомних взаємодій. Проведені раніше експериментально-теоретичні дослідження припорогового збудження найбільш низькоенергетичних автоіонізаційних станів $np^5(n+1)s^2$ в атомах натрію ($n=2$) [1, 2] та калію ($n=3$) [3, 4] виявили домінуючу роль резонансних станів негативних іонів у прямому та каскадному збудженні цих рівнів електронним ударом. У більш важких лужних металах, яким є рубідій, а також цезій [5], резонансні процеси повинні відігравати важливішу роль внаслідок значно більшого впливу кореляційних та релятивістських ефектів. На це вказували і спостереження сильної резонансної структури на функціях збудження метастабільних [6] та квазіметастабільних автоіонізаційних станів [7], що утворюються при збудженні $4p^6$ оболонки. Додатковим підтвердженням високої ефективності резонансних процесів при збудженні автоіонізаційних станів атомів рубідію є

наявність значного автоіонізаційного внеску в переріз електронної іонізації атомів рубідію [8]. На початок даних досліджень були повністю відсутні дані з енергетичних залежностей перерізів збудження атомних автоіонізаційних станів атомів рубідію. Єдине дослідження спектрів ежектованих електронів атомів рубідію, що утворюються при розпаді автоіонізаційних станів, було проведено для енергій зіткнень більше 27 еВ [9]. З 66 ліній, які спостерігались у спектрах, 35 ліній були ідентифіковані авторами з використанням даних з фотопоглинання [10].

В роботі коротко описано експериментальну установку, на якій проводились дослідження збудження автоіонізаційних станів атомів рубідію електронним ударом, методику проведення вимірів та приведені основні результати досліджень та їх обговорення.

Експериментальна установка та методика проведення вимірів

Дослідження проводились з використанням методу електронної спектроскопії та техніки атомних і електронних пучків, що перетинаються. Експериментальна установка складалась з електронного

спектрометра та джерела пучка атомів рубідію, розташованих у вакуумній камері, а також системи детектування корисного сигналу (див. рис. 1) [11]. Електронний спектрометр складався з джерела електронного пучка (п'ятиелектродна електронна гармата) та 127-градусного електростатичного аналізатора енергій електронів. Виміри електронних спектрів були проведені під кутом спостереження 54.7° та при значеннях інтенсивності електронного пучка 0.1-0.5 мкА в діапазоні енергій зіткнень 15-600 еВ. При цьому моноенергетичність пучка складала ~ 0.4 еВ.

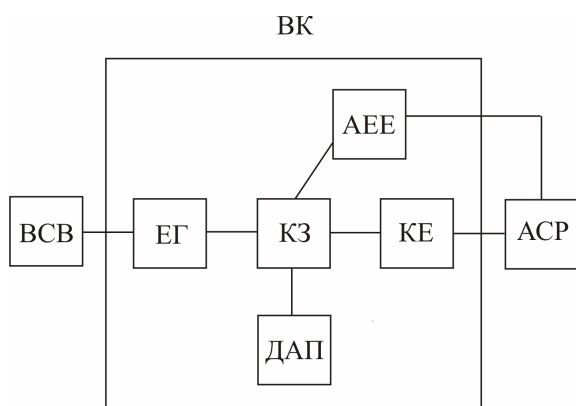


Рис. 1. Блок-схема експериментальної установки для дослідження перерізів електронного збудження автоіонізаційних станів атомів рубідію: ВК – вакуумна камера, АЕЕ – аналізатор енергій електронів, ЕГ – електронна гармата, ВСВ – вакуумна система відкачки, КЗ – камера зіткнень, ДАП – джерело атомного пучка, КЕ – колектор електронів, АСР – автоматизована система реєстрації.

Методика дослідження включала виміри електронних спектрів атомів рубідію для певних значень енергії первинних електронів. Ретельно вимірювались тестові електронні спектри, за допомогою яких контролювались умови експерименту. Такі спектри були досліджені для фіксованого значення енергії зіткнень після виміру кожних п'яти основних автоіонізаційних спектрів. Поведінка інтенсивності цих спектрів протягом всього часу вимірювань дозволяла визначити корекційний фактор, що використовувався при аналізі інтенсивності ліній в основних спектрах.

Функції збудження автоіонізаційних станів атомів рубідію визначались шляхом

визначення інтенсивності відповідних ліній у спектрах ежектованих електронів, отриманих для різних значень енергії зіткнень. Одержані інтенсивності ліній нормувалися на струм первинного електронного пучка. Відносна похибка вимірювань у припороговій області енергій 15-30 еВ становила близько 35 %, для даних отриманих при більш високих енергіях вона складала не більше 25 %.

Результати досліджень та їх обговорення

На рис. 2 наведені приклади електронних спектрів атомів рубідію для значень енергії зіткнень, близьких до порогу збудження автоіонізаційних рівнів та 440 еВ. У цілому спектри мають складну структуру, зумовлену щільним розташуванням ліній. Всі лінії в спектрах відповідають розпаду атомних автоіонізаційних станів $4p^5 n_1 n_2 l_2$ з утворенням іонів рубідію Rb^+ в основному стані $(4p^6)^1S_0$. Спектроскопічна ідентифікація деяких з цих станів зроблена на основі даних з фотопоглинання $4p^6$ оболонки [12] та теоретичних розрахунків [13], виконаних у Вільнюському університеті, і наведена в таблиці 1.

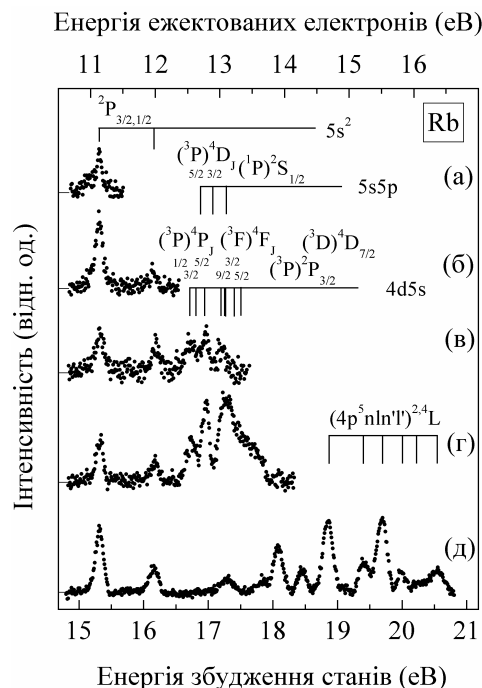


Рис. 2. Спектри ежектованих електронів атомів рубідію при енергіях зіткнень 15.52 еВ (а); 16.53 еВ (б); 17.42 еВ (в); 18.99 еВ (г); 440 еВ (д).

Як видно з рис. 2, дублетні лінії автоіонізаційних станів $(4p^5 5s^2)^2P_{3/2}$ і $(4p^5 5s^2)^2P_{1/2}$ є повністю розділені енергетично, тому це дає змогу чітко прослідкувати динаміку збудження цих ліній від самого порогу збудження до більш високих енергій. Для цих ліній у спектрах, виміряних при енергіях 15-30 еВ, спостерігається деяка асиметрія з боку більших енергій, що може бути викликано таким явищем, як взаємодія після зіткнення. Що стосується інших ліній, слід відмітити збільшення їх ширини в спектрах, виміряних для припорогових значень енергії зіткнень. Як і очікувалося, найбільш інтенсивні лінії ідентифіковані з дипольно-забороненими переходами в конфігурації $4p^5 5s 5p$ і $4d 5s$.

На рис. 3 і рис. 4 наведені функції збудження автоіонізаційних станів $(4p^5 5s^2)^2P_{3/2,1/2}$, одержані у діапазоні енергій зіткнень 15-600 еВ. Можна помітити, що обидві функції збудження мають подібний загальний вид – наявність сильних резонансів у припороговій області

енергій та менш інтенсивні максимуми прямого збудження в області 100 еВ. Припорогові максимуми розташовані при енергіях 16.1 еВ для стану $^2P_{3/2}$ та 17.0 еВ для $^2P_{1/2}$.

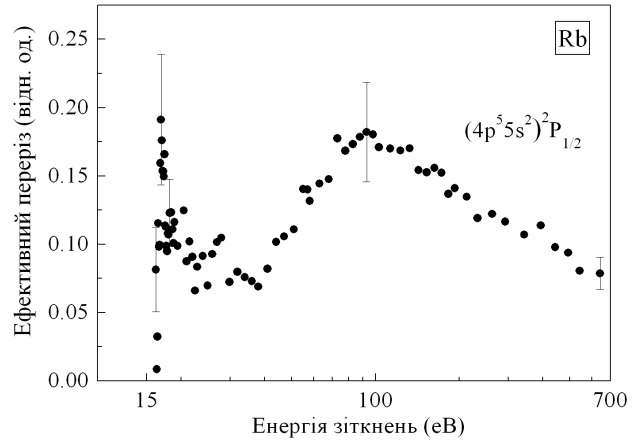


Рис. 3. Переріз електронного збудження автоіонізаційного стану $(4p^5 5s^2)^2P_{3/2}$ атома рубідію в діапазоні енергій зіткнень 15– 600 еВ.

Таблиця 1

Енергії збудження $E_{зб}$ (еВ) та спектроскопічна класифікація ліній, що спостерігаються в електронних спектрах атомів рубідію при енергіях зіткнень 15-600 еВ

Лінія	Класифікація	$E_{зб}$	
		наші дані	[12]
1	$4p^5 5s^2 ^2P_{3/2}$	15.31	15.31
2	$4p^5 5s^2 ^2P_{1/2}$	16.16	16.16
3	$4p^5 4d(^3P)5s ^4P_{1/2}$	16.69	16.69
4	$4p^5 4d(^3P)5s ^4P_{3/2}$	16.79	16.78
5	$4p^5 5s(^3P)5p ^4D_{5/2}$	16.90	
6	$4p^5 4d(^3P)5s ^4P_{5/2}$	16.97	16.96
7	$4p^5 5s(^3P)5p ^4D_{3/2}$	17.04	
8	$4p^5 4d(^3F)5s ^4F_{9/2}$	17.11	17.11
9	$4p^5 5s(^1P)5p ^2S_{1/2}$	17.18	
10	$4p^5 4d(^3F)5s ^4F_{3/2}$	17.23	17.52
	$4p^5 4d(^3F)5s ^4F_{5/2}$		17.71
11	$4p^5 4d(^3P)5s ^2P_{3/2}$	17.31	17.34
12	$4p^5 4d(^3D)5s ^4D_{7/2}$	17.36	17.66

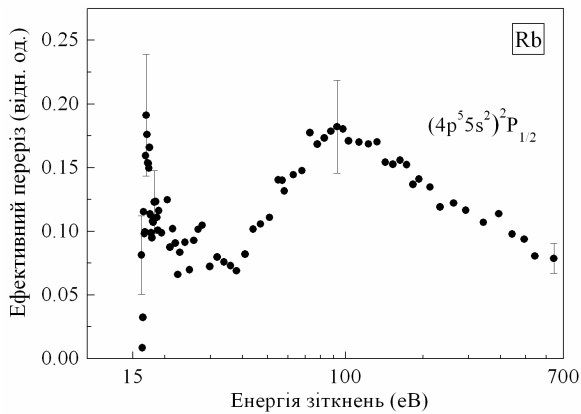


Рис. 4. Переріз електронного збудження автоіонізаційного стану $(4p^5 5s^2)^2P_{1/2}$ атома рубідію в діапазоні енергій зіткнень 15–600 еВ.

На функції збудження $^2P_{1/2}$ в області енергій 15-30 еВ спостерігається помітне зростання ефективності збудження, найбільш імовірною причиною якого в цій області є каскадні переходи з більш високоенергетичних рівнів та утворення і електронний розпад резонансних станів негативних іонів рубідію.

Як видно, основні максимуми перерізів прямого збудження розташовані при енергіях зіткнень ≈ 100 еВ, що повністю відповідає дублетному характеру цих рів-

нів. З подальшим ростом енергії зіткнень ефективність збудження повільно падає.

Висновки

Проведені виміри спектрів ежектованих електронів у діапазоні енергій зіткнень 15-600 еВ. Здійснена часткова ідентифікація ліній, які спостерігалися в електронних автоіонізаційних спектрах. Одержані попередні результати з енергетичних залежностей перерізів електронного збудження дублетних автоіонізаційних станів $(4p^5 5s^2)^2P_{3/2,1/2}$ атомів рубідію в діапазоні енергій зіткнень від порогу збудження до 600 еВ. У перерізах збудження виявлена резонансна структура, яка пов'язана з утворенням резонансних станів негативних іонів рубідію, а також з каскадними переходами з більш високоенергетичних рівнів.

Автор висловлює щирю подяку старшому науковому співробітнику, кандидату фіз.-мат. наук Боровику О.О. за постійний інтерес до роботи, всебічну підтримку та корисні зауваження.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Borovik A., Zatsarinny O. and Bartschat K. // *J. Phys. B: At. Mol. Opt. Phys.* - 2008. - V.41. - P. 035206.
2. Borovik A. and Kupliauskiene A. // *Phys. Scr.* - 2008. - V.77. - P. 055301.
3. Borovik A., Grum-Grzhimailo A., Bartschat K. and Zatsarinny O. // *J. Phys. B.* - 2005. - V.38. - P. 1081.
4. Kupliauskiene A., Bogdanovich P., Borovik A., Zatsarinny O., Grum-Grzhimailo A. and Bartschat K. // *J. Phys. B: At. Mol. Opt. Phys.* - 2006. - V.39. - P. 591.
5. Borovik A. and Kupliauskiene A. – *Kalamazoo, USA: Abstracts of Contributed Papers, XXVI ICPEAC, 2009.* - 042017 p.
6. Feldman P. and Novick R. // *Phys. Rev.* - 1967. - V.160. - P. 143.
7. Алексахин И., Богачев Г., Запесочный И., Угрин С. // *ЖЭТФ.* - 1981. - Т.80. - P. 2187.
8. Nygaard K.J. // *Phys. Rev. A.* - 1975. - V.11. - P. 1475.
9. Pejčev V., Rassi D., Ross K. and Ottley T. // *J. Phys. B.* - 1977. - V.10. - P. 1653.
10. Connerade J. // *Astrophys. J.* - 1970. - V.159. - P. 695.
11. Borovik A. // *Ukr. J. Phys.* - 2008. - V.53. - P. 1021.
12. Mansfield M. // *Proc. R. Soc. Lond. A.* - 1978. - V.364. - P. 135.
13. Kupliauskiene A., Borovik A., Jursenas R., Masys S. - *Vilnius, Lithuania: ICAMDATA 7, 2010.* - 74 p.

Стаття надійшла до редакції 28.05.2011

V.I. Roman

Institute of Electron Physics, National Academy of Sciences of Ukraine

88017, Uzhgorod, Universitetska Str., 21, Ukraine

e-mail: viktoriya-roman@mail.ru

EXPERIMENTAL SETUP AND FIRST RESULTS OF INVESTIGATION OF ELECTRON EXCITATION OF AUTOIONIZING STATES IN RUBIDIUM ATOMS BY ELECTRON IMPACT

The electron spectroscopy method and the crossed-beam techniques were used for obtaining the electron-impact excitation function of autoionizing states in rubidium atoms in an impact-energy range from the excitation threshold up to 600 eV. Measurements were carried out at the magic angle of 54.7° with an incident energy resolution of 0.4 eV or better. The spectroscopic identification of lines in electron spectra was performed. The resonance structure due to formation of negative-ion states in rubidium was revealed.

Key words: atom, autoionization, excitation, ionization, electron spectra, effective cross section.

В.И. Роман

Институт электронной физики НАН Украины

88017, Ужгород, ул. Университетская, 21, Украина

e-mail: viktoriya-roman@mail.ru

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ УСТАНОВКА И ПЕРВЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ ВОЗБУЖДЕНИЯ АВТОИОНИЗАЦИОННЫХ СОСТОЯНИЙ АТОМОВ РУБИДИЯ ЭЛЕКТРОННЫМ УДАРОМ

Методом электронной спектроскопии с использованием техники пересекающихся пучков впервые получены функции электронного возбуждения автоионизационных состояний атомов рубидия в диапазоне энергий столкновений от порога возбуждения состояний до 600 эВ. Исследования выполнены под магическим углом наблюдения 54.7° и с энергетическим разрешением не хуже 0.4 эВ. Выполнена спектроскопическая идентификация автоионизационных состояний. На функциях возбуждения обнаружено резонансную структуру, которая связана с процессом электронного распада состояний отрицательных ионов рубидия.

Ключевые слова: атом, автоионизация, возбуждение, ионизация, электронные спектры, эффективное сечение.