

УДК 539.186.188

В.І. Роман, В.В. Грицько, О.О. Боровик

Інститут електронної фізики НАН України,
вул. Університетська, 21, 88017, Ужгород, Україна
e-mail: viktoriyaroman11@gmail.com

ЕНЕРГЕТИЧНІ СПЕКТРИ РОЗСІЯНИХ ЕЛЕКТРОНІВ НА АТОМАХ РУБІДІЮ

Проведено виміри енергетичних спектрів автоіонізаційних і розсіяних електронів, що утворюються при збудженні $4p^6$ оболонки атомів рубідію електронним ударом. Здійснено експериментальний і теоретичний аналіз одержаних спектрів. Виявлено три метастабільні стани атомів рубідію та отримано для них основні параметри. Енергії збудження та ідентифікація даних станів порівняні із даними інших авторів.

Ключові слова: атом, автоіонізація, збудження, спектри енергетичних втрат.

Вступ

Експериментальне вивчення процесів зіткнень за участю електронів та атомів дає вкрай необхідну інформацію, яка використовується для побудови фундаментальних фізичних моделей атомних систем та перебігу елементарних процесів зіткнень. Особливо важливим при цьому є дослідження спектрів енергетичних втрат розсіяних електронів, які дозволяють вивчити збудження усіх типів атомних станів.

На сьогоднішній день енергетична структура автоіонізаційних і квазіметастабільних станів $4p^5n_1l_1n_2l_2$ в атомах рубідію вивчена досить добре (див. наприклад роботу [1] та посилання в ній), хоча спектроскопічна класифікація встановлена тільки для десяти рівнів з найбільш низьколежачих конфігурацій $4p^55s^2$, $4p^55s6s$ і $4p^55s5p$ [2]. Що стосується метастабільних станів атомів рубідію, то наявні тут малочислені теоретичні [3] та експериментальні дані [4,5] суперечать один одному. Це проявляється як у випадку енергетичних порогів збудження, так і класифікації станів.

З врахуванням усього вищесказаного, в даній роботі ми приводимо результати експериментального і теоретичного аналізу автоіонізаційних спектрів та спектрів

втрат з метою пошуку метастабільних станів атомів рубідію.

В роботі коротко описано експериментальну установку, на якій проводились дослідження, та методику проведення вимірів. Приведено енергетичні спектри автоіонізаційних і розсіяних електронів, що утворюються при збудженні $4p^6$ оболонки атомів рубідію електронним ударом. Здійснено порівняльний аналіз одержаних спектрів між собою, а також із даними фотопоглинання та теоретичними розрахунками. Виявлено три метастабільні стани атомів рубідію. Приведені основні параметри цих метастабільних станів, а також порівняння із даними інших робіт.

Експериментальна установка та методика проведення вимірів

Дослідження проводились методом електронної спектроскопії з використанням техніки пучків, що перетинаються. Детальний опис експериментальної установки і методики вимірювань можна знайти в [6]. Тут коротко зупинимось лише на основних деталях проведених досліджень.

Електронний спектрометр містить 127° електростатичний монохроматор з енергетичною роздільною здатністю не гірше 0.12 eV (повна ширина енергетичного розподілу електронів в пучку на

половині його висоти), аналізатор енергій електронів з енергетичним розділенням 0.04 eV і джерело пучка нейтральних атомів. Джерело нейтральних атомів з резистивним нагрівом працювало при температурі не більше 130° С, що забезпечувало мінімальну концентрацію димерів рубідію в атомному пучку.

Для реєстрації обох типів електронних спектрів у рамках спільної енергетичної розгортки, необхідною умовою є близьке взаємне розташування їх енергетичних діапазонів. З цією метою вимірювання проводилися при енергії зіткнень 25,5 eV.

Теоретичні розрахунки енергій, швидкостей розпаду і перерізів збудження рівнів $4p^5n_1n_2l_2$ проведені за нашим проханням А.В. Купляускієне у Вільнюському університеті з використанням програмного пакету [7] з урахуванням конфігураційної взаємодії в базисі релятивістських радіальних орбіталей Дірака-Фока-Слетера.

Результати досліджень та їх обговорення

На рис. 1 представлений спектр розсіяних електронів в області енергій збудження до потенціалу іонізації атома рубідію при 4,18 eV [2].

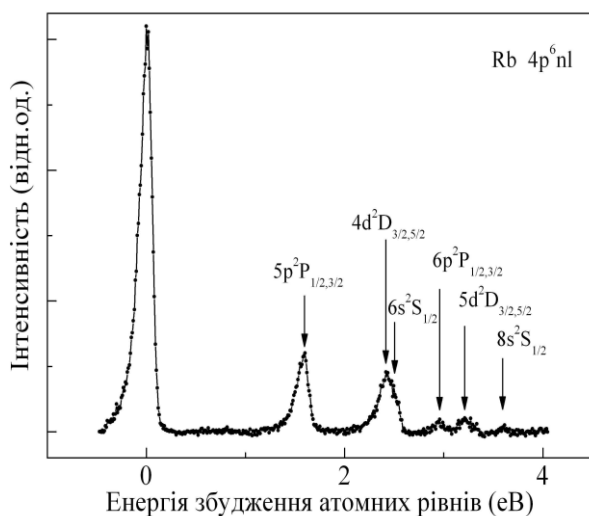


Рис. 1. Спектр енергетичних втрат розсіяних електронів при збудженні станів $4p^6nl$ при енергії зіткнень 22,8 eV.

Домінуючий пік при нульовій втраті енергії характеризує процес пружного розсіяння. Два наступні максимуми є результатом збудження нижніх енергетичних рівнів атома рубідію - $5p^2P_{1/2,3/2}$, $4d^2D_{3/2,5/2}$ та $6s^2S_{1/2}$. Далі спостерігається серія слабоінтенсивних піків, що відповідають збудженню рівнів $6p^2P_{1/2,3/2}$, $5d^2D_{3/2,5/2}$ та $8s^2S_{1/2}$. Даний спектр використовувався для калібрування енергії пучка первинних електронів, а також для визначення ступеню його моноенергетичності.

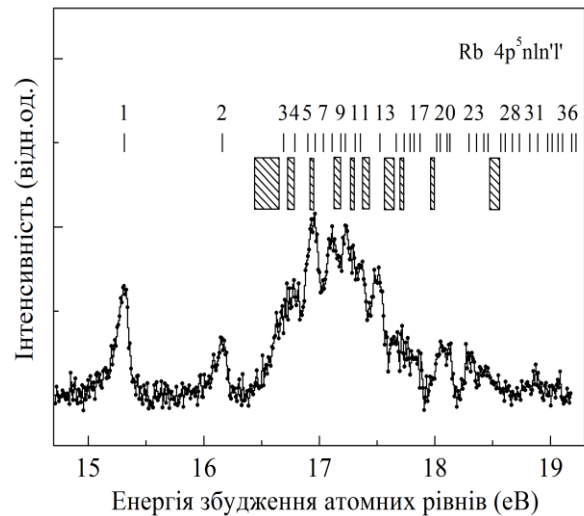


Рис. 2. Спектр енергетичних втрат розсіяних електронів при збудженні автоіонізаційних станів $4p^5nl n_1l_1$ енергії зіткнень.

Спектр енергетичних втрат розсіяних електронів при збудженні $4p^6$ оболонки атомів рубідію представлений на рис. 2. Вертикальними лініями на рисунку позначені відомі на даний час автоіонізаційні рівні атома рубідію [8], а заштриховані області вказують на енергетичне положення ліній, які не спостерігались в електронних спектрах та спектрах фотопоглинання [3]. Але як визначити, де саме у на спектрі наявні лінії, що відповідають розпаду метастабільних станів?

На рис. 3 приведено порівняння отриманих при енергії зіткнень 25,5 eV енергетичних спектрів автоіонізаційних (а) і розсіяних (б) електронів атомів рубідію. Відзначимо, що якщо перший тип спектрів відображає збудження і розпад тільки короткоживучих автоіонізаційних станів,

то другий показує ефективність збудження всіх рівнів $4p^5n_1n_2l_2$, включаючи квазі-метастабільні і метастабільні рівні. Порівняльний аналіз представлених спектрів виявляє цікаву особливість - в автоіонізаційному спектрі (а) ділянкам з мінімальною інтенсивністю (заштриховані) у спектрі енергетичних втрат (б) відповідають області з високою інтенсивністю ліній (див. лінії "а-в").

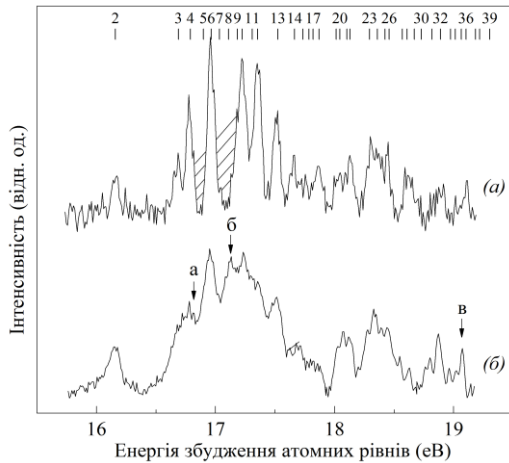


Рис. 3. Енергетичні спектри автоіонізаційних (а) і розсіяних (б) електронів при збудженні $4p^6$ оболонки атома рубідію електронами з енергією 25,5 еВ.

Причиною такої відмінності може бути ефективне припорогове збудження квартетних метастабільних станів, розпад яких, однак, не виявляється в автоіонізаційному спектрі внаслідок великих часів життя ($> 10^{-6}$ с).

У роботі [4] найбільш низьколежачий метастабільний стан атома рубідію було ідентифіковано як рівень $4d(^3F)5s^4F_{9/2}$ з порогом збудження при $15,8 \pm 0,3$ еВ. Проте подальші дослідження [5] встановили цей поріг при енергії 16,77 еВ і зв'язали його зі збудженням рівня $5s(^3P)5p^4D_{7/2}$. Як показують проведені теоретичні розрахунки, в спектрі (б) на рис. 3, цьому рівню відповідає при енергії $16,82 \pm 0,05$ еВ лінія "а". Лінії "б" і "в", розташовані при енергіях збудження 17,13 еВ і 19,07 еВ, ідентифіковані як лінії, що відповідають збудженню більш високолежачих метастабільних рівнів, відповідно, $4d(^3F)5s^4F_{9/2}$ і $5s(^3P)5d^4F_{9/2}$. Дані по параметрах і класифікації вивчених метастабільних автоіонізаційних рівнів атома рубідію наведені в таблиці 1.

Таблиця 1

Експериментальні E_{exp} і розраховані E_{cal} (в еВ) енергії збудження та імовірності розпаду A^a (в s^{-1}) метастабільних станів

Лінія	E_{exp}	E_{cal}	A^a	Класифікація
а	16.82; 16.77 ^[5]	16.463	2.88+06	$5s(^3P)5p^4D_{7/2}$
б	17.13; 15.8 ^[4]	17.097	4.76+06	$4d(^3F)5s^4F_{9/2}$
в	19.07	18.957	7.31+05	$5s(^3P)5d^4F_{9/2}$

Висновки

В роботі здійснено порівняльний аналіз автоіонізаційних спектрів та спектрів енергетичних втрат при збудженні атомів рубідію електронним ударом.

Порівняння із даними фотопоглинання та теоретичними розрахунками дозволило вперше виявити енергетичні пороги збудження трьох метастабільних рівнів атомів рубідію і провести їх класифікацію.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Borovik A., Roman V., Kupliauskienė A. The $4p^6$ autoionization cross section of Rb atoms excited by low-energy electron impact. J. Phys. B. – 2012. – V. 45. – P. 045204.
2. Sansonetti J.E. Wavelengths, Transition Probabilities, and Energy Levels for the Spectra of Rubidium „RbI through RbXXXVII // J. Phys. Chem. Ref. Data – 2006. – V. 35. – P. 301.
3. Mansfield M.W.D. A New Interpretation of the Rb I 4p Subshell Excitation Spectrum between 15 and 19 eV. Proc. R. Soc. Lond. – 1978. – V. A364. - P. 135.

4. Feldman P. and Novick R. Auto-Ionizing States in the Alkali Atoms with Microsecond Lifetimes // *Phys. Rev. A* – 1967. – V.160. – P. 143.
5. Novick R., Sprott G., and Lucatorto T. Identification of the lowest metastable autoionizing level in Rb from rf spectroscopic studies // *Phys. Rev. A*. – 1976. – V. 14. – P. 273.
6. Borovik A.A., Grum-Grzhimailo A.N., Bartschat K. and Zatsarinny O. Electron impact excitation of the $(3p^5 4s^2)^2P_{3/2,1/2}$ autoionizing states in potassium // *J. Phys. B*. – 2005. – V. 38. – P. 1081.
7. Gu M.F. The Flexible Atomic Code: IV. Autoionization and Dielectronic Recombination <http://kipc-tree-stanford.edu/fac> (2009).
8. Pejcev V., Rassi D., Ross K.J., Ottley T.W. High-resolution ejected-electron spectrum of rubidium vapour autoionising levels excited by electrons with kinetic energies in the range 27 to 400 eV // *J. Phys. B* – 1977. – V. 10. – P. 1653.

Стаття надійшла до редакції 01.06.2013

V.I. Roman, V.V. Hrytsko, A.A. Borovik

Institute of Electron Physics, National Academy of Sciences of Ukraine,
University Str., 21, 88017, Uzhhorod
e-mail: viktoriyaroman11@gmail.com

ENERGY SPECTRA OF SCATTERED ELECTRONS OF RUBIDIUM ATOMS

The energy spectra of autoionizing and scattered electrons due to excitation of the $4p^6$ subshell of rubidium atoms by electron impact were measured. The experimental and theoretical analysis of the obtained spectra was performed. Three metastable states of rubidium atoms were found and their basic parameters were obtained. The excitation energies and classification were compared with the data of other authors.

Keywords: atom, autoionization, excitation, energy-loss spectra.

В.И. Роман, В.В. Грицко, А.А. Боровик

Институт электронной физики НАН Украины,
ул. Университетская, 21, 88017, Ужгород
e-mail: viktoriyaroman11@gmail.com

ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ СПЕКТРЫ РАССЕЯННЫХ ЭЛЕКТРОНОВ НА АТОМАХ РУБИДИЯ

Проведены измерения энергетических спектров автоионизационных и рассеянных электронов, образующихся при возбуждении $4p^6$ оболочки атомов рубидия электронным ударом. Осуществлен экспериментальный и теоретический анализ полученных спектров. Обнаружено три метастабильных состояния атомов рубидия и получено для них основные параметры. Проведено сравнение энергий возбуждения и идентификация этих состояний с данными других авторов.

Ключевые слова: атом, автоионизация, возбуждение, спектры энергетических потерь.