

УДК: 539.184.5

PACS: 34.80.Dp, 32.80.Dz

DOI: 10.24144/2415-8038.2018.44.136-140

В.І. Роман<sup>1</sup>, О.О. Боровик<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>Інститут електронної фізики НАН України, вул. Університетська, 21, 88017, Ужгород

<sup>2</sup>Ужгородський національний університет, вул. Волошина, 54, 88000, Ужгород, Україна

e-mail: viktoriyaroman11@gmail.com

## ЕЛЕКТРОННЕ ЗБУДЖЕННЯ КВАЗІМЕТАСТАБІЛЬНОГО СТАНУ ( $4p^5 5s 5p$ )<sup>4</sup>S<sub>3/2</sub> АТОМА РУБІДІЮ

Експериментально досліджено електронне збудження квазіметастабільного стану ( $4p^5 5s 5p$ )<sup>4</sup>S<sub>3/2</sub> атома рубідію в діапазоні енергій зіткнень від порогу до 19 еВ. Функція збудження, яка одержана при моноенергетичності електронного пучка 0.12 еВ, вказує на наявність припорогових резонансів негативного іона рубідію. Здійснено порівняння з експериментальними та теоретичними перерізами збудження квартетного автоіонізаційного стану ( $4p^5 4d 5s$ )<sup>4</sup>P<sub>1/2</sub> атома рубідію та квазіметастабільного стану ( $3p^5 4s 4p$ )<sup>4</sup>S<sub>3/2</sub> атома калію. Максимальне значення перерізу збудження стану ( $4p^5 5s 5p$ )<sup>4</sup>S<sub>3/2</sub> складає  $\sigma = 3.77 \times 10^{-18}$  см<sup>2</sup>.

**Ключові слова:** атом, збудження, рубідій, квазіметастабільний стан.

### Вступ

Цікавою особливістю, яка проявляється при збудженні  $p^6$  оболонки у важких лужних атомах, є ефект конфігураційного змішування між квартетними та дублетними рівнями. Якщо квартетні рівні при цьому зберігають метастабільність по відношенню до автоіонізації, то можливим є утворення “квазіметастабільних” станів атома [1]. Для таких станів є відкритими радіаційний і електронний канали розпаду. Це дає змогу спостерігати їх як в енергетичних спектрах ежектованих електронів, так і в оптичних спектрах випромінювання [2, 3].

Ще однією особливістю, яка є характерною для майже всіх  $p^5 n_1 l_1 n_2 l_2$  автоіонізаційних станів (АІС) лужних атомів є наявність на їх функціях збудження інтенсивних резонансів в припороговій області енергій, походження яких можна пов'язати лише з утворенням короткоіснуючих станів негативного іона [4-6].

Радіаційний розпад АІС атомів калію та рубідію вперше досліджувався в [3]. У роботі представлено функції АІС з енергіями збудження 18.8 та 17 еВ, які відповідають лініям  $\lambda = 720$  Å атома калію та  $\lambda = 824$  Å атома рубідію. Автор попередньо ідентифікує дані АІС як квартети з конфігураціями  $3p^5 4s 4p$  (K) та  $4p^5 5s 5p$  (Rb).

Електронний канал розпаду квазіметастабільного стану ( $3p^5 4s 4p$ )<sup>4</sup>S<sub>3/2</sub> атома калію

було вперше досліджено в роботі [7]. Ці дослідження показали ефективність методу електронної спектроскопії з використанням моноенергетичного електронного пучка для дослідження розпаду квазіметастабільних станів.

Наші перші результати дослідження електронного розпаду квазіметастабільного стану ( $4p^5 5s 5p$ )<sup>4</sup>S<sub>3/2</sub> атома рубідію були представлені в [8], де розглянуто його функцію збудження в діапазоні енергій зіткнень до 3 еВ над порогом. Дана робота є продовженням цих досліджень. Ми представляємо детальний аналіз процесу електронного збудження квазіметастабільного ( $4p^5 5s 5p$ )<sup>4</sup>S<sub>3/2</sub> стану із залученням інших експериментальних даних із функцій збудження квартетного ( $4p^5 4d 5s$ )<sup>4</sup>P<sub>1/2</sub> АІС атома рубідію та квазіметастабільного ( $3p^5 4s 4p$ )<sup>4</sup>S<sub>3/2</sub> стану атома калію.

### Методика досліджень

Експериментальна техніка і методика проведення вимірювань описані в наших попередніх роботах [5, 9]. Тут коротко опишемо тільки основні деталі досліджень. Електронний спектрометр містив монохроматор первинного електронного пучка, аналізатор енергій ежектованих електронів та джерело пучка нейтральних атомів ефузійного типу [9]. Електронні спектри вимірювалися під "магічним" кутом спостереження 54.7° [10], при енергетичному розділенні

аналізатора 0.04 еВ і моноенергетичності первинного електронного пучка 0.12 еВ.

Функція збудження була одержана у вигляді нормованої на струм первинного електронного пучка інтенсивності лінії  $(4p^5 5s 5p)^4 S_{3/2}$  (див. рис. 1) в спектрах при різних значеннях енергії зіткнень. Одержана таким чином функція являє собою енергетичну залежність повного ефективного перерізу збудження АІС у відносних одиницях. Оскільки співвідношення інтенсивностей ліній у спектрі є прямопропорційним співвідношенню абсолютних значень їх перерізів збудження, знаючи абсолютне значення перерізу АІС  $(4p^5 5s^2)^2 P_{3/2}$ , яке при 17.6 еВ дорівнює  $6.2 \times 10^{-18} \text{ см}^2$  [5], ми визначили абсолютне значення перерізу досліджуваного стану.

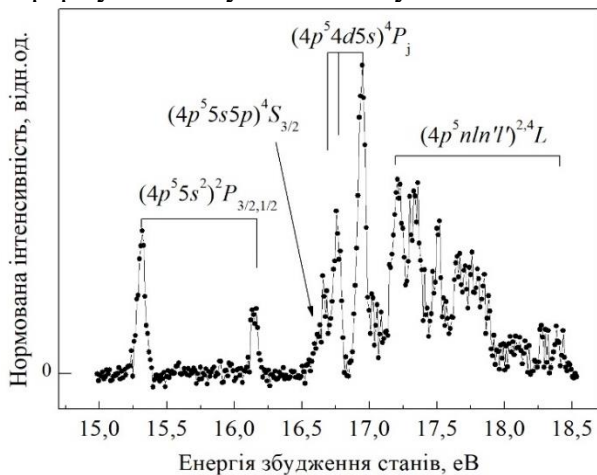


Рис. 1. Спектр ежектованих електронів атома рубідію при енергії зіткнень 18.5 еВ.

Невизначеність перерізу збудження сягала 40%. Крім суми всіх апаратурних похибок, це наслідок того, що лінія, яка відповідає розпаду АІС  $(4p^5 5s 5p)^4 S_{3/2}$  перекривається сусідньою, більш інтенсивною лінією (див. рис. 1), що відповідає розпаду  $(4p^5 4d 5s)^4 P_{1/2}$  АІС (енергії збудження 16.64 еВ та 16.69 еВ [11], відповідно).

### Результати та їх обговорення

На рисунку 2а) представлено функцію збудження квазіметастабільного стану  $(4p^5 5s 5p)^4 S_{3/2}$  в діапазоні енергій зіткнень 16.7-19.2 еВ. Переріз збудження характеризується наявністю слабого припорогового максимуму *k* та широкого максимуму близько 1.4 еВ над порогом із максимальним значенням перерізу  $\sigma = 3.77 \times 10^{-18} \text{ см}^2$ . Навіть при наявному розкиді точок можна впевнено окреслити принаймні три структурні особливості при 17.8,

18.1 та 18.3 еВ (позначені буквами *l*, *m*, *n*, відповідно). Така осциляційна поведінка перерізу може свідчити про утворення тут короткоіснуючих станів негативного іона  $Rb^-$ .

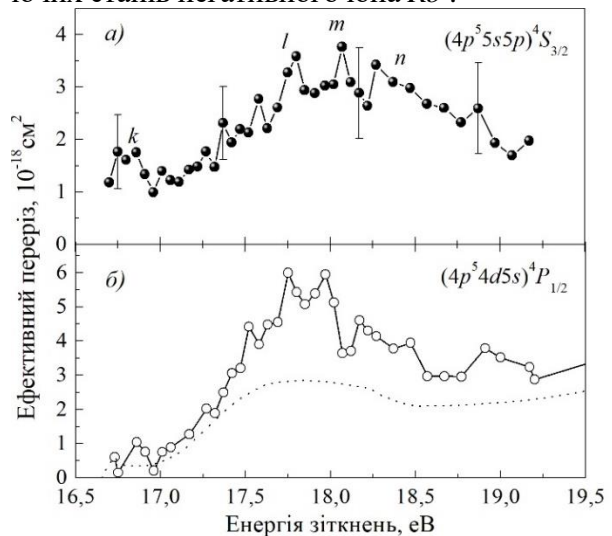


Рис. 2. Ефективні перерізи збудження квазіметастабільного  $(4p^5 5s 5p)^4 S_{3/2}$  стану (а) та  $(4p^5 4d 5s)^4 P_{1/2}$  АІС (б) атома рубідію. Пунктирна лінія – теоретичні розрахунки методом *R*-матриці з *B*-сплайнами [5].

Якщо порівняти даний переріз збудження із перерізом сусіднього по енергії збудження АІС  $(4p^5 4d 5s)^4 P_{1/2}$  (див. рис. 2б)), то можна помітити подібну енергетичну поведінку – маленький припороговий максимум і наступний чітко виражений широкий максимум. Детальний теоретичний аналіз перерізу  $(4p^5 4d 5s)^4 P_{1/2}$  [5] показав, що припорогове збудження даного АІС має виключно резонансний характер і розрахунки методом *R*-матриці з *B*-сплайнами (пунктирна лінія на рис. 2б)) прогноують наявність принаймні двох резонансів негативного іона  $Rb^-$  в цій області.

Аналогічний висновок можна зробити порівнявши перерізи збудження квазіметастабільних станів  $(4p^5 5s 5p)^4 S_{3/2}$  атома рубідію та  $(3p^5 4s 4p)^4 S_{3/2}$  атома калію (див. рис. 3). Загальна поведінка даних перерізів є різною – різкий припороговий максимум з осциляційною структурою  $(3p^5 4s 4p)^4 S_{3/2}$  стану і більш широкий максимум перерізу збудження  $(4p^5 5s 5p)^4 S_{3/2}$  стану, зсунутий на 1.5 еВ над порогом. Аналіз перерізу збудження стану  $(3p^5 4s 4p)^4 S_{3/2}$  разом з теоретичними розрахунками методом *R*-матриці з *B*-сплайнами (пунктирна лінія на рис. 3б)) показав, що резонансна осциляційна структура є суперпозицією шести парціальних перерізів станів іона *K* переважно з конфігурацією  $(3p^5 4s 4p^2)$ . Всі

парціальні перерізи містять по кілька вузьких резонансів приблизно однакової інтенсивності, що в кінцевому підсумку зумовлює складну структуру повного перерізу.

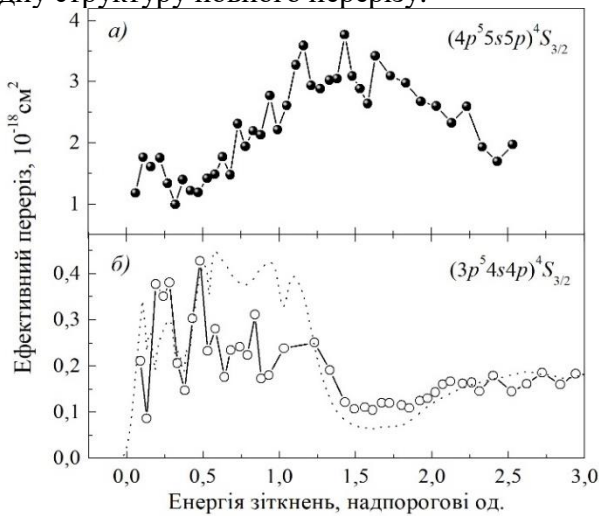


Рис. 3. Ефективні перерізи збудження квазімета-стабільних  $(4p^5 5s 5p)^4 S_{3/2}$  стану атома рубідію (а) та  $(3p^5 4s 4p)^4 S_{3/2}$  стану атома калію (б). Пунктирна лінія – теоретичні розрахунки методом  $R$ -матриці з  $B$ -сплайнами [5]. Експериментальні дані приведені в надпорогових одиницях, пороги збудження  $(4p^5 5s 5p)^4 S_{3/2}$  та  $(3p^5 4s 4p)^4 S_{3/2}$  станів – 16.64 еВ та 20.02 еВ, відповідно.

Слід також відмітити, що попередні дослідження припорогового збудження дублетних  $(np^5(n+1)s^2)P_{3/2,1/2}$  АІС в атомах натрію, калію та цезію [12] показали, що картина процесу резонансного електронного збудження субвалентної  $p^6$  оболонки в атомах лужних

металів представляє собою поступове ускладнення від натрію до цезію парціальної структури цих перерізів. Але разом із тим, суперпозиція великої кількості парціальних перерізів веде до видимого спрощення форми сумарного ефективного перерізу збудження станів. Це якраз і показує порівняння перерізів збудження квазімета-стабільних станів атома калію та рубідію – спрощення форми перерізу при переході до більш важчого атома. Але цей же факт та дослідження [12] вказують на те, що парціальна структура перерізу збудження  $(4p^5 5s 5p)^4 S_{3/2}$  стану атома рубідію має бути ще більш ускладнена, ніж в атома калію. Більш детальну картину парціального складу перерізу збудження даного стану можуть дати тільки теоретичні розрахунки.

У майбутньому планується дослідження функції збудження квазімета-стабільного  $(4p^5 5s 5p)^4 S_{3/2}$  стану при енергіях зіткнень до 100 еВ та порівняння її з оптичними даними [3].

### Висновки

У роботі представлено дослідження електронного каналу розпаду квазімета-стабільного  $(4p^5 5s 5p)^4 S_{3/2}$  стану атома рубідію в діапазоні енергій зіткнень до 3 еВ над порогом збудження. Аналіз поведінки перерізу збудження дослідженого стану та порівняння його з теоретичними й експериментальними даними перерізів збудження інших квартетних АІС вказують на складну парціальну структуру припорогового резонансного збудження за рахунок короткоіснуючих станів негативного іона  $Rb^-$ .

### СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Mendelson A.J., Barty C.P.J., Sher M.H., Young J.F., Harris S.E. Emission spectra of quasimeta-stable levels of alkali-metals atoms // *Phys. Rev. A.* – 1987. – V. 35. – No. 5. – P. 2095–2101.
2. Bogachev G.G., Marushka Ya.I. On the role of resonant processes in the excitation of certain  $KI^p$  emissions in electron-atom collisions // *XIX Int. Conf. on Photonic, Electronic and Atomic Collisions: Abstr. of Contrib. Papers.* – Vancouver, Canada, 1995. – P. 483.
3. Богачев Г.Г. О радиационном распаде автоионизационных состояний атомов калия и рубидия // *УФЖ.* – 1974. – № 12. – С. 2061–2062.
4. Borovik A., Zatsarinny O., Bartschat K. Resonance effects in electron and photon impact excitation of the  $p^6$  subvalence subshell in alkali atoms // *J. Phys. B.* – 2009. – V. 42. – No. 4. – P. 044010–044020.
5. Borovik A., Roman V., Zatsarinny O., Bartschat K. Electron impact excitation of the lowest doublet and quartet core-excited autoionizing states in Rb atoms // *J. Phys. B: At. Mol. Opt. Phys.* – 2013. – V.46, No. 1. – P.015203-015209.
6. Боровик А.А. Динамика електронного возбудження квартетних состояний атомов калия // *Опт. спектр.* – 2009. – Т. 106. – № 2. – С. 187–192.
7. Borovik A.A. Jr., Borovik A.A., Zatsarinny O., Bartschat K. Near-threshold electron-

- impact excitation of the  $3p^5 4s 4p^4 S_{3/2}$  quasimetastable state in potassium // *Phys. Rev. A.* – 2006. – V. 73. – P. 062701–062703.
8. Роман В.І. Електронне збудження стану  $(4p^5 5s 5p)^4 S_{3/2}$  атома рубідію // В зб.: Матеріали та програма науково-технічної конференції “ФЕЕ-2014” – Суми. – С. 94.
  9. Borovik A.A. An electron spectrometer for studying autoionization processes in metal vapors // *UPJ.* –2008. – V. 53, No. 10. – P. 1021–1027.
  10. Berezhko E. and Kabachnik N. Theoretical study of inner-shell alignment of atoms in electron impact ionisation: angular distribution and polarisation of x-rays and Auger electrons // *J. Phys. B.* – 1977. – V.10. – P.2467-2477.
  11. Роман В.І., Купліаускіене А.В., Боровик О.О., Зацарінний О.І. Динаміка збудження автоіонізаційних станів атома рубідію і молекули  $Rb_2$  при електрон-атомних зіткненнях // *Доповіді НАНУ.* – 2014, № 7. – С. 76–81.
  12. A. Borovik, O. Zatsarinny, K. Bartschat Excitation of the  $np^5(n+1)s^2 \ ^2P_{3/2}$  autoionizing states in Na, K, and Cs atoms by low-energy electron impact // *J. Phys: Conf. Ser.* – 2009. – V.194. –P. 042018.

Стаття надійшла до редакції 20.10.2018 р.

В.І. Роман<sup>1</sup>, А.А. Боровик<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>Інститут електронної фізики НАНУ, Україна, 88017, Ужгород, ул. Университетская, 21

<sup>2</sup>Ужгородський національний університет, Україна, 88000, Ужгород, ул. Волошина, 54,

## ЕЛЕКТРОННОЕ ВОЗБУЖДЕНИЕ КВАЗИМЕТАСТАБИЛЬНОГО СОСТОЯНИЯ $(4p^5 5s 5p)^4 S_{3/2}$ АТОМА РУБИДИЯ

Експериментально досліджено електронне возбудження квазіметастабільного стану  $(4p^5 5s 5p)^4 S_{3/2}$  атома рубідію в діапазоні енергій зіткнень від порога до 19 еВ. Функція возбудження, отримана при моноенергетичності електронного пучка 0.12 еВ, вказує на наявність припорогових резонансів. Проведено порівняння з експериментальними і теоретичними сеченнями возбудження квартетного автоіонізаційного стану  $(4p^5 4d 5s)^4 P_{1/2}$  атома рубідію і квазіметастабільного стану  $(3p^5 4s 4p)^4 S_{3/2}$  атома калію. Максимальне значення сечення возбудження стану  $(4p^5 5s 5p)^4 S_{3/2}$  рівно  $\sigma = 3.77 \times 10^{-18} \text{ см}^2$ .

Ключові слова: атом, возбудження, рубідій, квазіметастабільне стан.

V.I. Roman<sup>1</sup>, A.A. Borovik<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>Institute of Electron Physics. NAS of Ukraine, Ukraine, 88017, Uzhgorod, Voloshina Str., 54

<sup>2</sup>Uzhgorod National University, Ukraine, 88000, Uzhgorod, Universytetska Str., 21

## ELECTRON-IMPACT EXCITATION OF THE $(4p^5 5s 5p)^4 S_{3/2}$ QUASIMETASTABLE STATE IN RUBIDIUM ATOM

**Background:** Among the metals, the alkali atoms possess the simplest electronic structure of their outer shells, consisting of one valence electron and a filled subvalent shell. This makes them a favorite test object for experimental and theoretical studies of different excitation and ionization processes. An important role of resonance processes in excitation of the  $4p^5 n l n l 2$  autoionizing states in Rb atoms is expected from the evident resonance character of the autoionization contribution to the total ionization cross section and from the sharp rise of the excitation cross section close to the excitation thresholds of the lowest metastable and quasi-metastable autoionizing states. In the present work we consider the electron-impact excitation function of the  $(4p^5 5s 5p)^4 S_{3/2}$  state in Rb atom. By comparing

with other data we analyze the excitation processes forming the shape of excitation function at near-threshold impact energies.

**Methods:** The measurements were carried out using an ejected-electron spectrometer consisting of a monochromator and an analyzer for electrons (both of 127° electrostatic type) and an atomic beam source. Sets of spectra were processed by subtracting the background intensity in deriving the line intensities. The ejected-electron excitation function of the  $(4p^5 5s 5p)^4 S_{3/2}$  state was obtained as an incident-electron energy dependence of the corresponding line intensity. The cumulative relative uncertainty of the excitation cross section is estimated to be 40%.

**Results:** The ejected-electron excitation function for the  $(4p^5 5s 5p)^4 S_{3/2}$  state was studied in an impact energy region from the excitation threshold up to 3 eV above it. The excitation function shows small sharp resonance just above the threshold and a broad resonance lying about 1.5 eV above it with a “fine structure”  $k-n$ . The wide, asymmetric shape of these features suggests the combined effect of several overlapping resonances which are typical for excitation of the subvalence shells in heavy alkali atoms. A comparison of the excitation function was made with the excitation functions of the close-lying  $(4p^5 5s 5p)^4 P_{1/2}$  state and  $(3p^5 4s 4p)^4 S_{3/2}$  quasimetastable state in potassium. The cross section reaches its maximum value of  $3.77 \times 10^{-18} \text{ cm}^2$ .

**Conclusions:** The total excitation cross section of the  $4p^5 4s 4p^4 S_{3/2}$  quasimetastable level in rubidium has been investigated experimentally for incident electron energies up to 3 eV above the excitation threshold. In the experimental energy dependence of the cross section a complicated structure was found due to core-excited  $\text{Rb}^-$  resonances.

PACS NUMBER: 34.80.DP

## REFERENCES

- Mendelson A.J., Barty C.P.J., Sher M.H., Young J.F., Harris S.E. Emission spectra of quasimetastable levels of alkali-metals atoms // *Phys. Rev. A.* – 1987. – V. 35. – No. 5. – P. 2095–2101.
- Bogachev G.G., Marushka Ya.I. On the role of resonant processes in the excitation of certain  $\text{KI}^b$  emissions in electron-atom collisions // *XIX Int. Conf. on Photonic, Electronic and Atomic Collisions: Abstr. of Contrib. Papers.* – Vancouver, Canada, 1995. – P. 483.
- Bogachev G.G. On radiative decay of autoionizing states of potassium and rubidium atoms // *Ukr. Phys. J.* - 1974. - No. 12. - P. 2061-2062.
- Borovik A., Zatsarinny O., Bartschat K. Resonance effects in electron and photon impact excitation of the  $p^6$  subvalence subshell in alkali atoms // *J. Phys. B.* – 2009. – V. 42. – No. 4. – 044010–044020.
- Borovik A., Roman V., Zatsarinny O., Bartschat K. Electron impact excitation of the lowest doublet and quartet core-excited autoionizing states in Rb atoms // *J. Phys. B: At. Mol. Opt. Phys.* – 2013. – V.46. – P.015203-015209.
- Borovik A.A. Dynamics of electron impact excitation of quartet states in potassium atom // *Opt. Spectr.* - 2009. - V. 106. - P. 187-192.
- Borovik A.A. Jr., Borovik A.A., Zatsarinny O., Bartschat K. Near-threshold electron-impact excitation of the  $3p^5 4s 4p^4 S_{3/2}$  quasimetastable state in potassium // *Phys. Rev. A.* – 2006. – V. 73. – P. 062701–0627.
- Roman V.I. Electron impact excitation of the  $(4p^5 5s 5p)^4 S_{3/2}$  state of rubidium atom // In the book: *Materials and program of the scientific and technical conference "FEE-2014"* - Sumy. - P. 94.
- Borovik A.A. An electron spectrometer for studying autoionization processes in metal vapors // *UPJ.* –2008. – V. 53. – P. 1021–1027.
- Berezhko E. and Kabachnik N. Theoretical study of inner-shell alignment of atoms in electron impact ionisation: angular distribution and polarisation of x-rays and Auger electrons // *J. Phys. B.* – 1977. – V.10. – P.2467-2477.
- Roman V.I., Kupliauskiene A.V., Borovik A.A., Zatsarinny O.I. Excitation dynamics of autoionizing states in rubidium atom and molecule  $\text{Rb}_2$  in electron-atom collisions // *Reports of NASU.* – 2014. – V. 7. – P. 76–81.
- A. Borovik, O. Zatsarinny, K. Bartschat. Excitation of the  $np^5(n+1)s^2 \text{ } ^2P_{3/2}$  autoionizing states in Na, K, and Cs atoms by low-energy electron impact // *J. Phys: Conf. Ser.* – 2009. – V.194. –P. 042018.